

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Maquinabilidade de Ligas Cu-Zn e Impacto da Utilização de Ferramentas WC Revestidas em Processo Produtivo

Luís Amaral



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Orientador FEUP: Prof. Dr. Abílio Manuel Pinho de Jesus

Orientador INEGI: Eng^o Santiago David Castellanos Villa

Co-orientador INEGI: Eng^o Rui Miguel Brás Soares

Orientador GROHE: Eng^o Victor Fernandes

10 de Outubro de 2017

Maquinabilidade de Ligas Cu-Zn e Impacto da Utilização de Ferramentas WC Revestidas em Processo Produtivo

Luís Amaral

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Resumo

Este trabalho é o resultado de um estágio curricular na empresa GROHE Portugal, S.A. e teve como principal objetivo o estudo da maquinabilidade de ligas de Cu-Zn (ligas de latão) e a melhoria de algumas ferramentas de corte. A GROHE é uma empresa que se dedica ao fabrico de artigos sanitários, que têm por base o latão. Atualmente, e devido a pressões internacionais, existe a necessidade de se transitar para ligas de latão com um teor de Chumbo residual (até 0.25% do peso), o que irá exercer grandes pressões sobre o setor de maquinagem, pois é esperada uma diminuição da maquinabilidade do material.

No que à maquinagem diz respeito, as diferenças introduzidas pelo elemento Pb nas ligas Cu-Zn (ligas de latão) são bastante significativas, pelo que numa primeira fase do trabalho, procurou-se então estudar a maquinabilidade das ligas de latão utilizadas na empresa. Nesse sentido, foram realizados diversos ensaios com vista à caracterização do material. Parte destes, foram ensaios de torneamento, que permitiram estudar os efeitos dos diversos parâmetros de corte na maquinabilidade das ligas. Esta análise permitiu uma otimização dos parâmetros de corte para o processo produtivo.

As ferramentas de corte são um dos elementos com maior impacto económico no processo produtivo, pelo que é necessário estudá-las para perceber qual a sua influência no processo. O presente trabalho procura apresentar vantagens e/ou desvantagens de diversas soluções de engenharia capazes de suplantar estes problemas. Uma das propostas ensaiadas foi a aplicação de revestimentos nas ferramentas, com vista a uma maior durabilidade das mesmas. Foram realizados ensaios de furação, em condições semelhantes ao processo produtivo, com dois revestimentos distintos, AlCrN e AlTiN. Comparando o desempenho e esforços de corte das ferramentas revestidas com ferramentas normais foi possível ver a contribuição dos revestimentos no processo. Para além dos revestimentos, outra das soluções implementadas, passou pela melhoria da geometria das ferramentas.

Outras melhorias foram ainda implementadas no processo produtivo, tais como a redução de tempos de ciclo através de uma gestão eficiente de ferramentas, no revólver das máquinas, bem como a introdução de elementos de controlo de qualidade (calibres).

As ligas Cu-Zn com Pb acarretam esforços de corte bastante menores do que as ligas sem Pb, pelo que se pode afirmar que as ligas de Cu-Zn (latão) com Pb são mais fáceis de maquinar. Na maquinabilidade de ligas de latão, os esforços de corte são bastante importantes, e dependentes essencialmente da profundidade de corte e do avanço dado, enquanto que as rugosidades superficiais dependem quase exclusivamente do avanço.

O revestimento AlTiN, ao contrário do revestimento AlCrN, implementado nas ferramentas de corte não trouxe uma vantagem significativa em termos de desgaste, tendo resultado num desgaste mais acentuado relativamente à ferramenta sem revestimento. O revestimento AlCrN apresentou resultados promissores, podendo ser uma solução a explorar no futuro.

Algumas melhorias, entre as quais taxas de produção, controlo de qualidade e redução de custos, foram efetuadas no processo produtivo.

As melhorias trazidas ao processo produtivo são interessantes essencialmente pela possibilidade que representam de, ao serem mais exploradas, trazerem grandes retornos para a empresa, nomeadamente para o departamento.

Palavras-chave: Ligas Cu-Zn (latão), Chumbo, Maquinabilidade, Ferramentas de Corte, Revestimentos, Esforços de Corte, Artigos Sanitários em Latão

Abstract

This work is the result of a curricular internship at GROHE Portugal, S.A. and its main purpose is to study the machinability of Cu-Zn (brass) alloys and optimize some cutting tools. GROHE's core business is related to sanitary fittings which have brass as their raw material. Nowadays and due to the international pressure there is a need to reduce lead content in brass alloys (up to 0.25% weight) which will increase the pressure on machining processes since it is expected the material becoming more difficult to be machined.

When it comes to machining, Pb introduces great differences therefore, in the first phase of this work Cu-Zn (brass) alloys' machinability, used or intended to be used in the company, are studied. For that purpose, several experiments were performed aiming the material characterization. Part of these, performed in a lathe machine, made possible the study of the effects of the cutting parameters in the alloys' machinability. This analysis is very important as it can be used to optimize the cutting parameters in the manufacturing process.

Cutting tools are one of the main economic consumables in machining processes, being the reason why it is necessary to study its influence in the process. The present work seeks to evaluate the advantages and/or disadvantages of several engineering solutions capable of overcoming this problem. One of the experimented solutions selected was the application of coatings in the tools testing better durability. Drilling tests were conducted, using similar conditions used at GROHE, using two different coatings, AlCrN and AlTiN. By comparing the performance and cutting forces of coated tools with normal ones it was possible to see the contribution of the coatings in the process. Besides coatings, other solution implemented was the optimization of tools' geometry.

Other improvements were implemented in the process such as the reduction of cycle time with an efficient management of tools in the turret of the CNC machines and the introduction of elements for quality control check (measuring gauge).

Cu-Zn (brass) alloys with Lead have lower machining efforts than the Lead-free Cu-Zn alloys from which Lead brass alloys are much easier to machine. In brass alloys' machinability, cutting forces are very important and essentially dependent on the feed and depth of cut, while surface roughness depends almost exclusively on feed.

AlCrN and AlTiN coatings were tested and the application of AlTiN has not brought significant improvements in tool wear, revealing more tool wear than uncoated tools. AlCrN coating presented better results and can be a solution for future development.

Some improvements were made in the process in areas such as quality control check, increase in production and cost improvement.

Keywords: Cu-Zn (brass) Alloys, Lead, Machinability, Cutting Tools, Tool Coatings, Cutting Forces, Brass Sanitary Fittings

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à GROHE Portugal, nomeadamente ao departamento de maquinaria na pessoa do Eng^o Victor Fernandes, pela oportunidade e confiança em mim depositadas, bem como permitir a ligação do ensino ao mundo profissional. De referir também toda a liberdade e incentivo dados, ao longo de todo este projeto.

Ainda no departamento de maquinaria gostaria de expressar a minha gratidão ao Sr. Adelino Tavares que sempre me acompanhou e ensinou tanto quanto pôde. Agradeço também ao departamento de fundição, Eng^o João Fonte, pela disponibilidade em ceder amostras das ligas de latão, bem como toda a informação a elas inerente. A toda a equipa do departamento de maquinaria e restantes colaboradores da GROHE Portugal, o meu muito obrigado.

À empresa AFIPRE, na pessoa do Sr. Nélson Nogueira, por todo o conhecimento transmitido, conselhos e ajuda no processo dos revestimentos das ferramentas.

Ao meu orientador, Eng^o Abílio Jesus, e co-orientadores, Eng^o Santiago Villa e Eng^o Rui Soares, por todo o acompanhamento, conselhos, auxílio prestado na procura de soluções, ajuda na execução dos ensaios e sábia orientação, sem os quais este projeto não seria possível.

Ao Eng^o Miguel Figueiredo pela ajuda e contribuição na análise de dados, que tanta relevância trouxe ao trabalho.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto por todos os ensinamentos dados, bem como à minha formação como ser humano. Ainda na Faculdade, gostaria de agradecer à equipa das oficinas do DEMec por toda a disponibilidade e permitir que a parte experimental da dissertação fosse possível. Ao INEGI, nomeadamente ao departamento de metalografia, pelo auxílio na preparação e análises das amostras de latão.

Aos meus amigos, sempre presentes, pelo companheirismo, amizade e partilha de momentos durante toda a vida académica.

Um especial agradecimento à pessoa que sempre, desde o início do projeto, me apoiou e motivou, permitindo superar-me a mim mesmo, obrigado Joana Gomes.

À minha família, sustento de toda a minha formação e ensinamento, obrigado por todo o esforço e confiança, em mim depositados, ao longo deste trabalho e da minha vida.

A todos os que, de uma ou outra forma, permitiram e contribuíram para o meu crescimento, em especial com este trabalho, o meu mais sincero obrigado.

O autor agradece ao projeto colaborativo LAETA, METALCUT, pelo apoio concedido à execução deste trabalho.

O autor agradece à operação NORTE-01-0145-FEDER-000022 - SciTech - Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries, projeto de I&D cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte ("NORTE2020"), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).



"There's nothing I believe in more than getting young people interested in science and engineering, for a better tomorrow, for all humankind."

Bill Nye

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	GROHE - Empresa e Enquadramento	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura	3
2	Processo de Maquinagem	5
2.1	Maquinagem	5
2.2	Ferramentas de Corte	7
2.2.1	Materiais	7
2.2.2	Vida das Ferramentas	14
2.2.3	Geometria	20
2.2.4	Revestimentos	23
2.3	Operações, Parâmetros e Fluidos de Corte	27
2.3.1	Operações	27
2.3.2	Parâmetros de Corte	28
2.3.3	Forças e Potências de Maquinagem	29
2.3.4	Fluidos de Corte	35
2.4	Ligas Cu-Zn, Latão	37
2.5	Maquinabilidade de Ligas Cu-Zn, Latão	40
2.6	Maquinagem na GROHE	43
2.6.1	Ferramentas de Corte	44
2.6.2	Operações, Parâmetros e Fluidos de Corte	45
3	Maquinabilidade de Ligas Cu-Zn, Latão	47
3.1	Obtenção do Latão na GROHE	47
3.2	Procedimento Experimental	49
3.2.1	Provetes de Ensaio	49
3.2.2	Ensaio de Maquinagem	50
3.2.3	Análise Química e Microestruturas	55
3.2.4	Ensaio de Dureza	56
3.3	Perspetiva sobre os Esforços	57
3.4	Análise e Discussão de Resultados	57
3.4.1	Ensaio de Maquinagem	57
3.4.2	Apara	68
3.4.3	Ensaio de Dureza	72
3.4.4	Composição Química e Microestruturas	73
3.4.5	Rugosidades	78
3.5	Análise ANOVA	82

4	Impacto da Aplicação de Ferramentas de Corte Revestidas em Processo Produtivo	87
4.1	Ferramentas	87
4.1.1	Revestimentos	88
4.2	Procedimento Experimental	89
4.2.1	Revestimentos Utilizados	89
4.2.2	Preparação das Peças	91
4.2.3	Ensaio de Furação	92
4.3	Análise e Discussão de Resultados	95
4.3.1	Furação	95
4.3.2	Apara	101
5	Algumas Propostas de Melhoria do Processo Produtivo	103
5.1	Tempos de Ciclo	103
5.2	Geometria de Ferramentas	105
5.3	Qualidade	107
6	Conclusões e Perspectivas de Trabalhos Futuros	111
6.1	Conclusões	111
6.2	Perspectivas de Trabalhos Futuros	113
	Referências	115
A	Ensaio torneamento	121
B	Ensaio furação	127

Lista de Figuras

1.1	Torneiras GROHE [1]	1
1.2	Chuveiros GROHE [1]	1
2.1	Tenacidade vs resistência ao desgaste de materiais para ferramentas de corte (adaptado de [12])	8
2.2	Dureza de alguns materiais de ferramentas em função da temperatura de trabalho (adaptado de [9])	9
2.3	Propriedades mecânicas do metal duro função da percentagem de cobalto (adaptado de [9])	10
2.4	Influência do tamanho de grão e percentagem de cobalto na dureza do carboneto sinterizado [13]	10
2.5	Dureza de diferentes carbonetos em função da temperatura [15]	11
2.6	Zonas de desgaste de ferramenta monofilar [9]	14
2.7	Fenómenos de desgaste originados pela interação ferramenta-material (adaptado de [18])	14
2.8	Resistência ao desgaste e tempo de vida dos materiais de ferramentas (adaptado de [9])	15
2.9	Efeito da velocidade de corte no desgaste de flanco para três velocidades diferentes. Valores hipotéticos de velocidade e de tempos de vida de uma ferramenta são representados (adaptado de [9])	16
2.11	Tipos de desgaste de ferramentas, causas e soluções [4]	18
2.12	Relação entre a velocidade de corte e o tempo de vida de uma ferramenta (adaptado de [9])	19
2.13	Pastilhas para ferramentas de corte [19]	20
2.14	Ferramentas de corte integrais - brocas [20]	20
2.15	Ferramenta com insertos soldados [21]	20
2.16	Ferramenta de corte especial com plaquetas [22]	21
2.17	Ferramenta de corte com suporte incorporado [23]	21
2.18	Representação esquemática de ângulos característicos de uma ferramenta de corte em torneamento cilíndrico; χ - ângulo de posição, γ - ângulo de ataque, λ - ângulo de inclinação (adaptado de [24])	21
2.19	Variação da geometria da apara em função do ângulo de posição da aresta de corte, χ [10]	22
2.20	Esquema da deformação da apara e influência do ângulo de ataque, γ [10]	22
2.21	Representação esquemática do ângulo de saída (α), ângulo de gume (β) e ângulo de ataque (γ) [10]	22
2.22	Condições de contacto no processo de arranque de apara dependendo das condutividades térmicas dos revestimentos (adaptado de [25])	23

2.23	Dureza de diferentes materiais consoante a espessura (adaptado de [28])	24
2.24	Revestimento usual [29]	25
2.25	Revestimento HiPIMS [29]	25
2.26	Resistência ao desgaste de flanco e por cratera de diferentes materiais do revestimento [36]	27
2.27	Principais operações de maquinagem convencional: (a) torneamento, (b) furação, (c) e (d) fresagem (adaptado de [9])	28
2.28	Componentes da força de maquinagem no torneamento cilíndrico longitudinal [10]	30
2.29	Variação da pressão específica de corte, função da força de corte, F_c , com a secção de apara não deformada, S [11]	31
2.30	Pressão específica de corte em função da secção da apara não deformada, para torneamento [11]	31
2.31	Pressão específica de corte para os vários grupos ISO de materiais, para secção de apara de 1 mm^2 [4]	31
2.32	Tipos de formação de apara na maquinagem, a) descontínua, b) contínua, c) contínua com apara aderente e d) serrilhada (adaptado de [9])	33
2.33	Formas de apara segundo a norma ISO 3685 [10]	34
2.34	Distribuição das temperaturas na apara, ferramenta e peça, na maquinagem de aço com uma ferramenta em metal duro P20, $V_c = 60 \text{ m/min}$, $f_n = 0.32 \text{ mm}$ [11]	34
2.35	Rugosidade da superfície função do raio de ponta da ferramenta, r_ϵ , e do avanço, f_n [4]	35
2.36	Refrigeração externa [43]	36
2.37	Refrigeração interna [44]	36
2.38	Maquinagem com sistema de refrigeração abundante convencional [46]	37
2.39	Maquinagem com sistema de refrigeração MQL [46]	37
2.40	Resistividade Elétrica ($\mu\text{Ohm.cm}$) vs Condutividade Térmica ($\text{W/m.}^\circ\text{C}$) [14]	38
2.41	Condutividade Térmica ($\text{W/m.}^\circ\text{C}$) vs Preço (EUR/kg) [14]	38
2.42	Diagrama de fases do sistema Cu-Zn [50]	40
2.43	Apara de maquinagem das ligas $\text{CuZn}_{39}\text{Pb}_3$ (esquerda) e $\text{CuZn}_{21}\text{Si}_3\text{P}$ (direita), $V_c = 400 \text{ m/min}$, $f_n = 0.2 \text{ mm/rot}$, $a_p = 2 \text{ mm}$ [54]	41
2.44	Desgaste comparativo de ferramentas em WC na maquinagem de ligas de latão com diferentes composições de Pb, $\text{CuZn}_{21}\text{Si}_3\text{P}$ com 0.09% e $\text{CuZn}_{39}\text{Pb}_3$ com 3% [54]	42
2.45	Exemplos de microestruturas de ligas de latão com chumbo, 3.3% (a), e valor residual de chumbo, 0.9% (b) [3]	42
2.46	Exemplo de ferramenta de furação - referência 829A5125	45
3.1	Molde utilizado para o vazamento de chuveiros em latão	48
3.2	Serra de fita de corte do material vazado	48
3.3	Provetes vazados para ensaios de maquinabilidade: R1 e R2 - material GROHE DZR, L1 e L2 - material GROHE Light, Z1 e Z2 - material GROHE 0	50
3.4	Torno paralelo <i>EFI DU20</i> utilizado nos ensaios de torneamento	51
3.5	Porta-ferramentas com pastilha de corte em metal duro com inserto PCD do fabricante MAPAL (ref ^a : DCGW11T304F01N-0AA [59])	51
3.6	Dimensões em mm da pastilha de corte [60]	51
3.7	Célula de carga utilizada nos ensaios de torneamento montada no torno	52
3.8	Esquema da célula de carga e suporte da ferramenta: a - sistema de fixação <i>KISTLER 9403</i> ; b - dinamómetro piezoelétrico <i>KISTLER 9257B</i> (adaptado de [61])	52

3.9	Amplificador de carga <i>KISTLER 5070</i> (cima), com sistema de medição de esforços <i>HBM Spider8</i> (baixo)	52
3.10	Rugosímetro portátil <i>Hommel Tester T500</i> utilizado nos ensaios de torneamento [62]	55
3.11	Secção de disco para análise microestrutural	56
3.12	Amostras em suporte de resina e polidas	56
3.13	Processo de polimento convencional	56
3.14	Equipamento Dia Testor 2 Rc	56
3.15	Metodologia para tratamento de dados dos ensaios de torneamento: a) espectro completo; b) espectro truncado ($V_c = 431.97$ m/min, $f_n = 0.05$ mm/rot, $a_p = 0.25$ mm, provete L1)	58
3.16	Variação da força de corte (F_c) com a variação da composição do elemento Pb nas ligas, para $V_c = 79.17$ m/min, $f_n = 0.25$ mm/rot, $a_p = 1.5$ mm	58
3.17	Pormenor de um dos varões maquinados evidenciando a diferença no comprimento de maquinagem	59
3.19	Potências de corte da liga Z, em função do avanço e velocidade de corte: a) $a_p = 0.25$ mm; b) $a_p = 0.5$ mm; c) $a_p = 1.5$ mm	62
3.20	Pressões específicas de corte das ligas L e R, em função do avanço e velocidade de corte: a) $a_p = 0.25$ mm; b) $a_p = 0.5$ mm; c) $a_p = 1.5$ mm	64
3.21	Pressões específicas de corte da liga Z, em função do avanço e velocidade de corte: a) $a_p = 0.25$ mm; b) $a_p = 0.5$ mm; c) $a_p = 1.5$ mm	65
3.22	Esforços de corte, F_c , para as três ligas: L (azul), R (verde) e Z (amarelo), em função do avanço e velocidade de corte: a) $a_p = 0.25$ mm; b) $a_p = 0.5$ mm; c) $a_p = 1.5$ mm	67
3.23	Pormenor da apara obtida nos ensaios 1 a 9 das ligas L, R e Z (código de ensaios - ver Tabela A.1)	69
3.24	Pormenor da apara obtida nos ensaios 10 a 18 das ligas L, R e Z (código de ensaios - ver Tabela A.1)	70
3.25	Pormenor da apara obtida nos ensaios 19 a 27 das ligas L, R e Z (código de ensaios - ver Tabela A.1)	71
3.26	Pormenor da apara obtida nos ensaios 28 a 33 das ligas L, R e Z (código de ensaios - ver Tabela A.1)	72
3.27	Disco com superfície queimada da análise química, com secção para análise microestrutural	74
3.28	Microestrutura da liga L, secção do meio do provete, ampliação de 150x	75
3.29	Microestrutura da liga L, secção periférica do provete, ampliação de 150x	75
3.30	Microestrutura da liga R, secção do meio do provete, ampliação de 150x	75
3.31	Microestrutura da liga R, secção periférica do provete, ampliação de 150x	75
3.32	Microestrutura da liga Z, secção do meio do provete, ampliação de 150x	76
3.33	Microestrutura da liga Z, secção periférica do provete, ampliação de 150x	76
3.34	Microestrutura da liga L, secção do meio do provete, ampliação de 150x	76
3.35	Microestrutura da liga R, secção do meio do provete, ampliação de 150x	77
3.36	Microestrutura da liga Z, secção do meio do provete, ampliação de 150x	77
3.37	Rugosidade da superfície (R_a , R_z e R_{max}) na liga L para condições de a_p igual a 0.25, 0.5 e 1.5 mm para a), b) e c), respetivamente, V_c em m/min	79
3.38	Rugosidade da superfície (R_a , R_z e R_{max}) na liga R para condições de a_p igual a 0.25, 0.5 e 1.5 mm para a), b) e c), respetivamente, V_c em m/min	80
3.39	Rugosidade da superfície (R_a , R_z e R_{max}) na liga Z para condições de a_p igual a 0.25, 0.5 e 1.5 mm para a), b) e c), respetivamente, V_c em m/min	81

3.40	Efeito da interação $V_c * a_p$ em R_{max}	84
3.41	Efeito da interação $V_c * f_n$ em R_{max}	84
3.42	Efeito da interação $a_p * f_n$ em R_{max}	84
4.1	Ferramenta de corte com amaciamento no gume	88
4.2	Ferramenta de corte com craterização na face de ataque	88
4.3	Produto final - chuveiro [1]	91
4.4	Ferramenta utilizada para os ensaios de furação	91
4.5	Chuveiro com e sem as duas primeiras operações de maquinagem; 1) fresagem de face, 2) furação	91
4.6	Posicionamento das peças para ensaios de furação	93
4.7	Fresadora CNC <i>OKUMA MC-40VA</i> utilizada nos ensaios de furação	93
4.8	Célula de carga utilizada nos ensaios de furação	94
4.9	a - sistema de fixação (mordente); b - dinamómetro piezoelétrico <i>KISTLER 9272</i> (adaptado de [61])	94
4.10	Metodologia para tratamento de dados dos ensaios de furação: a) ensaios não tratados e b) ensaios tratados ($n = 2500$ rot/min; $V_f = 600$ mm/rot, $l_{inicial} = 16$ mm e $V_f = 100$ mm/rot, $l_{final} = 1$ mm)	95
4.11	Pormenor do furo sem e com a segunda operação efetuada, a) b) e c) d), respetivamente	96
4.12	Esforços e binários de corte dos ensaios de furação nos dois furos, com o revestimento Latuma (1ª peça); $n = 2500$ rpm, $V_f = 600$ mm/rot	96
4.13	Forças de avanço (F_z) das ferramentas, para o furo maior e para o furo menor, a) e b), respetivamente, com diferentes níveis de produção	98
4.14	Divisão das arestas de corte na ferramenta consoante o seu nível de desgaste	99
4.15	Superfície das ferramentas de corte, com (AlCrN) e sem revestimento, após 1 peça produzida	100
4.16	Superfície das ferramentas de corte, com (AlCrN) e sem revestimento, após 4000 peças produzidas	100
4.17	Superfície das ferramentas de corte, para os níveis de produção de 7280, 8280 e 4400 peças para as ferramentas AlTiN, AlCrN e sem revestimento, respetivamente	101
4.18	Apara gerada na maquinagem de latão, para as condições de corte $V_c = 240$ m/min e $f_n = 0.24$ mm/rot	102
5.1	Representação esquemática de revólver de ferramentas, de uma máquina CNC, com 42 posições	104
5.2	Tempo ganho por peça com troca eficiente de ferramentas	105
5.3	Ferramenta antiga com aresta de facejamento (a) e ferramenta nova sem aresta de facejamento (b)	106
5.4	Pormenor da geometria de um componente maquinado	108
5.5	Esquema de calibre passa/não passa	108
A.1	Desenho dos provetes de latão utilizados nos ensaios de torneamento	121
A.2	Esforços de corte, para a liga L, para: a) $a_p = 0.25$, b) $a_p = 0.5$ e c) $a_p = 1.5$ mm (V_c em m/min)	124
A.3	Esforços de corte, para a liga R, para: a) $a_p = 0.25$, b) $a_p = 0.5$ e c) $a_p = 1.5$ mm (V_c em m/min)	125
A.4	Esforços de corte, para a liga Z, para: a) $a_p = 0.25$, b) $a_p = 0.5$ e c) $a_p = 1.5$ mm (V_c em m/min)	126

B.1	Desenho e principais dimensões do componente de chuveiro - GROHE	128
B.2	Desenho do mordente fabricado para os ensaios de furação, escala 1:2	129
B.3	Desenho da geometria da ferramenta de corte	130
B.4	Esforços de corte e binário de corte para a produção da 1ª peça: a) referente ao furo maior e b) referente ao furo menor	131
B.5	Esforços de corte e binário de corte para a produção da 4000ª peça: a) referente ao furo maior e b) referente ao furo menor	132
B.6	Esforços de corte e binário de corte para a furação final: a) referente ao furo maior e b) referente ao furo menor	133

Lista de Tabelas

2.1	Propriedades de alguns materiais para ferramentas de corte [10]	8
2.2	Propriedades mecânicas de alguns carbonetos [14]	11
2.3	Composição química e propriedades mecânicas de classes de metal duro segundo a norma ISO [10, 11, 16]	12
2.4	Propriedades mecânicas de cerâmicos [14]	13
2.5	Propriedades mecânicas dos materiais ultra-duros [10]	14
2.6	Velocidades de corte e avanços para operações de furação [39]	29
2.7	Pressão específica de corte para vários materiais usando uma ferramenta afiada e com uma profundidade de corte, $a_p = 0.25$ mm (adaptado de [9])	32
3.1	Propriedades mecânicas das ligas GROHE fornecidas pela empresa e revistas, segundo a norma DIN EN 1982	48
3.2	Matriz de ensaios de torneamento	54
3.3	Análise da dureza das ligas de latão e da influência da distância ao centro do provete	73
3.4	Análise da dureza das ligas de latão na periferia dos provetes	73
3.5	Composição química das ligas de ensaio	74
3.6	Teste ANOVA para a rugosidade máxima R_{max} da liga L	83
3.7	Valor P e contribuição percentual das variáveis, segundo o teste ANOVA, para a liga L	84
3.8	Valor P e contribuição percentual das variáveis, segundo o teste ANOVA, para a liga R	85
3.9	Valor P e contribuição percentual das variáveis, segundo o teste ANOVA, para a liga Z	85
4.1	Propriedades dos revestimentos BALINIT® do Fabricante Oerlikon [38]	90
4.2	Comparação de custos entre a ferramenta base e os diversos revestimentos	90
5.1	Número de trocas de ferramenta e tempos de produção por peça em [s]	105
5.2	Preço da ferramenta com e sem a aresta de facejamento, referência antiga e nova respectivamente	107
A.1	Matriz de ensaios de torneamento	122
A.2	Tempos de maquinagem em segundos para $l = 10$ mm	123
A.3	Binómio parâmetros de corte vs tempo de maquinagem: custos energéticos de maquinagem para as três ligas para um comprimento de referência $l = 10$ mm, custos em unidades monetárias	123

Abreviaturas e Símbolos

Abreviaturas

<i>Al</i>	Alumínio
<i>Al₂O₃</i>	Alumina
<i>AlTiN</i>	Nitreto de Titânio Alumínio
<i>As</i>	Arsênio
<i>Cermet</i>	Compósito de cerâmicos e metais
<i>CBN</i>	Nitreto cúbico de Boro
<i>CNC</i>	Comando Numérico Computorizado (<i>Computer Numerical Control</i>)
<i>Co</i>	Cobalto
<i>CO₂</i>	Dióxido de Carbono
<i>Cr</i>	Crômio
<i>CrN</i>	Nitreto de Crômio
<i>Cu</i>	Cobre
<i>CVD</i>	<i>Chemical Vapour Deposition</i>
<i>CW</i>	Carboneto de Tungstênio
<i>Fe</i>	Ferro
<i>FCVA</i>	<i>Filtered Cathodic Vapour Arc</i>
<i>HiPMIS</i>	<i>High-Power Impulse Magnetron Sputtering</i>
<i>HM</i>	Metal duro (<i>Hard Metal</i>)
<i>HRSA</i>	Ligas resistentes ao calor (<i>High Resistant Super Alloys</i>)
<i>HSS</i>	Aço rápido (<i>High Speed Steels</i>)
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
<i>Mn</i>	Manganês
<i>Mo</i>	Molibdênio
<i>MQL</i>	Quantidade mínima de lubrificação (<i>Minimal Quantity Lubrication</i>)
<i>NbC</i>	Carboneto de Nióbio
<i>Ni</i>	Níquel
<i>PACVD</i>	<i>Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition</i>
<i>Pb</i>	Chumbo
<i>PCD</i>	Diamante policristalino
<i>PM</i>	Pulverometalurgia
<i>PVD</i>	<i>Physical Vapour Deposition</i>
<i>Si</i>	Silício
<i>Si₃N₄</i>	Nitreto de Silício
<i>SiC</i>	Carboneto de Silício
<i>Sn</i>	Estanho
<i>TaC</i>	Carboneto de Tântalo
<i>TiAlN</i>	Nitreto de Alumínio Titânio
<i>TiB₂</i>	Diboreto de Titânio
<i>TiC</i>	Carboneto de Titânio

<i>TiCN</i>	Carbonitreto de Titânio
<i>TiN</i>	Nitreto de Titânio
<i>TiSi</i>	Silicato de Titânio
<i>W</i>	Tungstênio
<i>Zn</i>	Zinco
<i>ZrC</i>	Carboneto de Zircônio
<i>ZrN</i>	Nitreto de Zircônio

Símbolos

a_p	Profundidade de corte [mm]
a_r	Largura fresada [mm]
d	Profundidade [mm]
D	Diâmetro [mm]
f	Avanço [mm]
f_n	Avanço por rotação [mm/rot]
f_z	Avanço por aresta ou dente [mm]
F_a	Força de avanço (ou F_x) [N]
F_c	Força de corte (ou F_z) [N]
F_{ec}	Força efetiva de corte [N]
F_m	Força de maquinagem [N]
F_p	Força de profundidade de corte (ou F_y) [N]
h	Altura do obstáculo [mm]
K_s	Pressão específica de corte [N/mm^2 ou MPa]
l	Comprimento de maquinagem [mm]
L_c	Comprimento de base [mm]
L_t	Comprimento de medição [mm]
M_z	Binário transmitido pela árvore à ferramenta [Nm]
n	Frequência de rotação [rpm]
P_c	Potência de corte [W]
P_{ec}	Potência efetiva de corte [W]
R_a	Rugosidade média aritmética [μm]
R_ϵ	Raio de ponta da ferramenta [mm]
R_m	Tensão de rutura [MPa]
R_{max}	Rugosidade máxima [μm]
$R_{p0.2}$	Tensão limite elástico de proporcionalidade [MPa]
R_z	Rugosidade máxima média [μm]
S	Secção da apara não deformada [mm^2]
t	Tempo de corte [s]
T	Tempo de vida [min]
V	Taxa de remoção de material (ou Q - <i>Material Removal Rate</i>) [cm^3/min]
V_c	Velocidade de corte [m/min]
V_f	Velocidade de avanço da mesa [mm/min]
z	Número de arestas de corte na ferramenta

Símbologia Grega

χ	Ângulo de posição da aresta de corte [°]
γ	Ângulo de ataque [°]
λ	Ângulo de inclinação da aresta de corte [°]

Capítulo 1

Introdução

Este trabalho insere-se no âmbito da unidade curricular Dissertação, do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da FEUP, na especialização de Produção, Conceção e Fabrico. A dissertação foi desenvolvida em ambiente empresarial, na empresa GROHE AG - Portugal.

1.1 GROHE - Empresa e Enquadramento

A GROHE AG é uma empresa multinacional alemã, atualmente pertencente ao grupo LIXIL Group Corporation, cuja atividade é a produção de componentes sanitários (como exemplificam as Figuras 1.1 e 1.2). Destacando-se como uma das empresas líderes do setor de mercado, em 2015, a GROHE operava com 6000 colaboradores e teve um volume de negócios nesse mesmo ano a rondar os 1300 milhões de euros.

A fábrica de Albergaria-a-velha, local de desenvolvimento do projeto, fabrica apenas alguns dos produtos da família GROHE, quer chuveiros, quer torneiras. A secção fabril é composta por diversos setores, entre eles, a fundição, a maquinagem, a secção do lixamento/polimento, galvanica e por fim a montagem, que conclui o sector produtivo da fábrica. No caso específico de alguns produtos que assim o requeiram, passam ainda por um setor, anterior à montagem, para a aplicação de revestimentos por PVD, que confere acabamentos de alta qualidade às peças produzidas. O presente trabalho foi desenvolvido em conjunto com o departamento de Maquinagem.

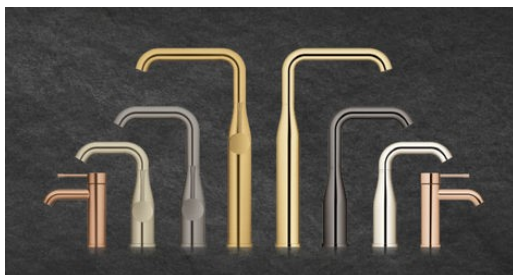


Figura 1.1: Torneiras GROHE [1]



Figura 1.2: Chuveiros GROHE [1]

O material de base para os produtos fabricados pela GROHE é o latão, utilizado sob a forma de três ligas Cu-Zn distintas. A existência de diferentes ligas é justificada com as diferentes necessidades (diferentes composições químicas da água, legislação específica, etc.) dos vários países e mercados globais.

O latão é o material de eleição para este tipo de aplicações pois possui boas propriedades térmicas, preço relativamente baixo e outras características atrativas que serão apresentadas mais adiante. Um dos elementos químicos presentes na sua composição que, entre outras propriedades, auxilia na maquinagem, é o chumbo. Recentemente, estudos e legislações internacionais têm procurado diminuir o teor de chumbo em componentes sanitários, pelo facto de que a sua incorporação em tais produtos, possa pôr em risco a saúde humana. Desse modo, a diminuição e/ou retirada do chumbo causará grandes pressões no setor da maquinagem, pois o processo será bastante afetado. Os esforços de corte para a maquinação das ligas sem chumbo serão maiores e, por consequência, o desgaste das ferramentas também será mais acentuado [2, 3].

A necessidade de desenvolver um estudo de maquinagem destas ligas premeia-se com o presente projeto em que se procura igualmente dar um passo à frente e aumentar o tempo de vida das ferramentas, antecipando mudanças no material de base a maquinar.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho prendem-se com melhorias no processo produtivo da GROHE, nomeadamente no departamento de maquinagem, e com o registo de informações pertinentes acerca do mesmo, nomeadamente de tempos de vida de ferramentas. As melhorias estendem-se a várias temáticas que, em seguida, serão descritas com mais detalhe. Assim, os objetivos primários deste trabalho são:

- Caracterização dos materiais - o conhecimento dos materiais base utilizados é de fundamental importância para um correto processo de fabrico. Para tal, pretendem-se realizar ensaios de caracterização dos materiais de modo a permitir conhecer as propriedades, tais como ensaios de dureza, análise química e microestrutural;
- Análise de aparas e medição de rugosidades resultantes de processos de maquinagem;
- Conhecimento dos Esforços de Corte - é pois, importante estudar e perceber quais os esforços de corte envolvidos na maquinagem das diversas ligas utilizadas pela empresa. Este tema é importante uma vez que futuramente, dar-se-á na GROHE a transição de uma liga Cu-Zn (latão) com Pb para outra mais difícil de maquinar (liga de latão com menos Pb). Trata-se do objetivo primário pois, através de uma correta utilização dos parâmetros de corte, advirá um processo correto de maquinagem;
- Melhoria do material das ferramentas - embora o substrato da ferramenta não seja passível de ser modificado, a implementação de revestimentos nas ferramentas pode ser uma melhoria no sentido de aumentar o tempo de vida da mesma. Com o aumento do tempo de

vida esperado para a ferramenta, será possível também diminuir tempos de paragem para substituição de ferramentas e redução de *stocks*;

- Melhoria da geometria de ferramentas - através da otimização da extensão da aresta de corte;

Adicionalmente, outros objetivos são propostos:

- Redução de custos - conseguir alguma versatilidade de algumas ferramentas, não comprometendo o seu tempo de vida, sendo possível reduzir também stocks e compras de ferramentas;
- Otimizar ferramentas - analisar e comparar os parâmetros de corte de uma ferramenta com a análise de esforços de corte efetuada, de modo a maximizar a sua utilização (custo/benefício);
- Redução de tempos de ciclo - com um planeamento eficaz e correto posicionamento das ferramentas no revólver da máquina CNC, procura-se diminuir tempos improdutivos, nomeadamente tempos de troca de ferramentas.

1.3 Estrutura

A realização deste trabalho implica diversas etapas essenciais, distribuídas pela seguinte ordem de conteúdos:

- **Introdução:** Introdução à dissertação, apresentando um enquadramento do projeto e da empresa onde foi realizada, os objetivos e a estrutura adotada;
- **Processo de Maquinagem:** Pesquisa bibliográfica que incide sobre o processo de maquinagem, ferramentas e parâmetros de corte, fenómenos de desgaste das ferramentas de corte e revestimentos aplicados nas mesmas. A introdução às ligas Cu-Zn (latão) e sua maquinabilidade é também necessária, referindo ainda o processo de maquinagem na empresa;
- **Maquinabilidade de Ligas Cu-Zn, Latão:** Obtenção de material para análise experimental, descrição do procedimento, ensaios mecânicos com vista à caracterização da maquinagem das ligas de latão utilizadas na GROHE e ainda, apresentação e discussão de resultados;
- **Impacto da Aplicação de Ferramentas de Corte Revestidas em Processo Produtivo:** Este capítulo trata a aplicação de diferentes revestimentos, em ferramentas de corte na maquinagem de latão, desenvolvendo-se com base numa ferramenta em específico. São efetuados alguns ensaios experimentais seguidos de uma apresentação e discussão de resultados;
- **Algumas Propostas de Melhoria do Processo Produtivo:** Neste capítulo são registadas algumas melhorias introduzidas no processo produtivo, bem como a sua relevância e peso para o mesmo.

- **Conclusões e Perspetivas de trabalhos Futuros:** Apresentam-se as conclusões retiradas do presente trabalho, como também se propõem algumas melhorias e perspetivas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Processo de Maquinagem

2.1 Maquinagem

A maquinagem é um processo de fabrico que envolve essencialmente três elementos, são eles a máquina-ferramenta onde é efetuada a operação, a peça a ser maquinada e a ferramenta, elemento que trabalha a peça. Existindo uma vasta panóplia de materiais passíveis de serem utilizados neste processo de fabrico, é essencial introduzir um outro conceito - maquinabilidade.

Maquinabilidade é a maior ou menor facilidade com que um material pode ser processado através de uma ferramenta de corte, procedendo-se ao arranque de aparas e alterando assim a sua geometria para alcançar a forma final. O desgaste da ferramenta é um aspeto central da maquinagem que deve ser tido em conta, pois com um maior desgaste, a ferramenta terá uma maior dificuldade em processar o material [4, 5].

O processo de maquinagem é um processo afetado por inúmeras variáveis, muitas vezes difíceis de controlar e/ou prever no processo, nomeadamente:

- Máquina-ferramenta
 - Potência - uma das condicionantes do processo é a potência que a máquina disponibiliza para o processo. Dependendo das características da peça e da ferramenta, os parâmetros de corte mais adequados à qualidade ou produtividade desejadas podem ser condicionados por este mesmo fator. Embora os equipamentos estejam projetados para que este fator não seja impeditivo do processo, poderá nalguns casos específicos ser relevante;
 - Avanços - cada vez mais o fator tempo tem um peso preponderante nos custos dos processos de modo que o aumento dos avanços tem sido um objetivo constante para os fabricantes. O tempo gasto nos avanços rápidos de reposicionamento das cabeças de corte, bem como nas trocas de ferramentas não é tempo útil, ou seja, é desperdício (necessário ao processo). Deste modo têm-se conseguido grandes progressos em avanços rápidos, desde 20 m/min, no caso de máquinas mais antigas, até 60 ou 80 m/min nos equipamentos mais recentes [6, 7];

- Porta-ferramenta - elemento de grande importância que pode condicionar o processo não só pelo número de ferramentas que suporta, mas também pelos tempos de troca de ferramentas, caso não haja um sistema de dupla garra;
- Estado da máquina - por vezes, folgas existentes decorrentes do uso da máquina, quer no posicionamento das peças, quer na execução dos movimentos das ferramentas, podem incorrer nalgumas imperfeições no produto. Relacionado ainda, a robustez do equipamento pode igualmente ser relevante, visto que influencia as vibrações e a qualidade das peças produzidas;
- Material da peça
 - Composição química - fator bastante importante que, para além de condicionar o material da ferramenta de corte, afeta também a maquinabilidade da peça. Essa maquinabilidade pode ser afetada por elementos químicos (reatividade química), pelo tamanho de grão, inclusões à superfície, constituintes duros e outros tipos de impurezas, assim como na resistência mecânica do material a maquinar decorrente da composição do material ou de processos de tratamento prévios aplicados ao mesmo [8];
 - Geometria - a forma das peças a maquinar, respetivas tolerâncias e o estado da superfície (rugosidade) exigidos, requerem sempre atenção, de modo a cumprir com as especificações, mantendo sempre o processo o mais eficiente possível;
- Ferramenta de corte
 - Composição - necessariamente a ferramenta de corte necessita de ter na sua composição elementos que lhe permitam ter uma dureza (superficial) superior à da peça a maquinar e resistir às temperaturas de maquinagem sem danificar as suas propriedades (dureza a quente). Para além da dureza superficial que necessita de ter para combater a abrasividade, o substrato da ferramenta de corte necessita também de ser tenaz para suportar os esforços induzidos pelo processo de corte sem fraturar a ferramenta [9];
 - Estado - o desgaste da ferramenta relacionado com o seu uso provoca alterações à geometria da ferramenta, impedindo-a de desempenhar eficientemente o seu trabalho, com impacto na qualidade das peças maquinadas;
 - Geometria - a geometria da ferramenta é fundamental e deve sempre adequar-se ao perfil geométrico pretendido para a peça. Arestas de corte a mais podem levar a gastos económicos desnecessários, bem como arestas de corte a menos podem levar a esforços elevados e baixas produtividades;
- Preparação do processo
 - Precisão - a fixação da peça à máquina e a limpeza superficial da mesma, são bastante importantes, pois qualquer folga existente no aperto da peça poderá causar desvios nas operações de maquinagem pretendidas. Ainda relativamente ao desalinhamento da

peça, a presença de limalhas ou outros contaminantes deixados na máquina, decorrentes de operações anteriores, podem também causar desalinhamentos na maquinagem ou afetar o desempenho da ferramenta de corte, caso interfiram com as ferramentas;

- Parâmetros de corte - a adequação dos parâmetros de corte do processo tendo em vista a peça a maquinar e a ferramenta a utilizar são igualmente decisivos para que a maquinagem decorra sem quaisquer problemas. Isto é, parâmetros de corte errados podem causar vibrações, desgaste excessivo das ferramentas e ainda micro fissuras na peça. Este elemento, chave na maquinagem, é responsável por grande parte das ineficiências do processo.

2.2 Ferramentas de Corte

As ferramentas de corte no processo de maquinagem são essenciais e de extrema importância, pois são estes elementos que desempenham a função de corte do material. Tendo em conta o material a maquinar, as propriedades requeridas nas ferramentas podem variar bastante consoante a aplicação. No entanto, uma ferramenta de corte adequada necessita, essencialmente, das seguintes características [9–11]:

- Elevada resistência ao desgaste (elevado tempo de vida);
- Dureza a frio e a quente (resistência ao calor gerado no processo);
- Elevada condutividade térmica (capacidade para dissipar ou conduzir o calor gerado);
- Elevada tenacidade;
- Quimicamente inerte (ter pouca ou nenhuma afinidade química com o material a maquinar);
- Baixo coeficiente de atrito (reduzir esforços de corte e geração de calor por fricção);
- Baixo coeficiente de dilatação térmica (minimizar variações dimensionais com impacto nas tolerâncias das peças maquinadas).

2.2.1 Materiais

A utilização de um grande número de ferramentas de corte em processos altamente dependentes da maquinagem acarreta grandes custos em tempos não produtivos, nomeadamente na troca de ferramentas desgastadas. Nesse sentido, e aliado à necessidade de uma oferta diversificada de ferramentas, têm-se assistido a um grande progresso e desenvolvimento ao nível dos materiais das ferramentas [10]. Atualmente existem vários grupos de materiais para ferramentas de corte:

- *Aços Rápidos (HSS - High Speed Steels);*
- *Carbonetos Sinterizados;*

- *Cermets*;
- *Carbonetos Sinterizados Revestidos*;
- *Cerâmicos*;
- *CBN e PCD*.

Atualmente, as ferramentas de carbonetos sinterizados são as mais utilizadas, sendo os aços rápidos ainda usados de forma significativa. A utilização de outros materiais em ferramentas é menos expressiva e aplicada, na maioria das vezes, em aplicações especiais.

O desenvolvimento dos equipamentos, nomeadamente sistemas de aperto de ferramentas (anti-vibratório) e a maior rigidez das máquinas, tem permitido uma utilização de materiais frágeis, como é o caso dos cerâmicos e dos ultra-duros (CBN e PCD), cada vez mais intensa. A Tabela 2.1 e a Figura 2.1 ilustram algumas propriedades dos diversos materiais para ferramentas de corte.

Tabela 2.1: Propriedades de alguns materiais para ferramentas de corte [10]

Material	Dureza HV 10/30	Tensão de rotura transversal [MPa]	Módulo de elasticidade [GPa]	Coef. de dilatação térmica [$\times 10^{-6}/K$]	Cond. térmica [W/mK]
Aço rápido	700-900	2500-4000	2.6-3	9-12	15-48
Carbonetos	1200-1800	1300-3200	4.7-6.5	4.6-7.5	20-80
Cerâmicos (Al_2O_3)	1450-2100	400-800	300-450	5.5-8	10-38
Nitreto de Boro Cúbico (CBN)	3500-4000	500-800	6.8	4.9	100
Diamante Policristalino (PCD)	5000-6000	600-1100	8.4	1.5	550

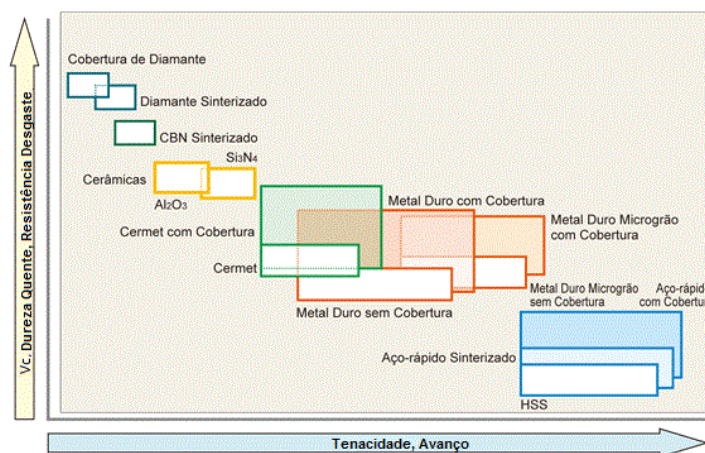


Figura 2.1: Tenacidade vs resistência ao desgaste de materiais para ferramentas de corte (adaptado de [12])

A dureza dos materiais não é sempre constante, ou seja, as suas condições de trabalho podem fazer variar algumas das suas propriedades, entre as quais a dureza. Quanto maior for a temperatura do material menor será a sua dureza e, conseqüentemente, menor será o seu poder de corte. Como tal, é de interesse escolher uma ferramenta cujo material se adeque às suas condições de trabalho. A Figura 2.2 ilustra a variação da dureza de alguns materiais consoante a temperatura.

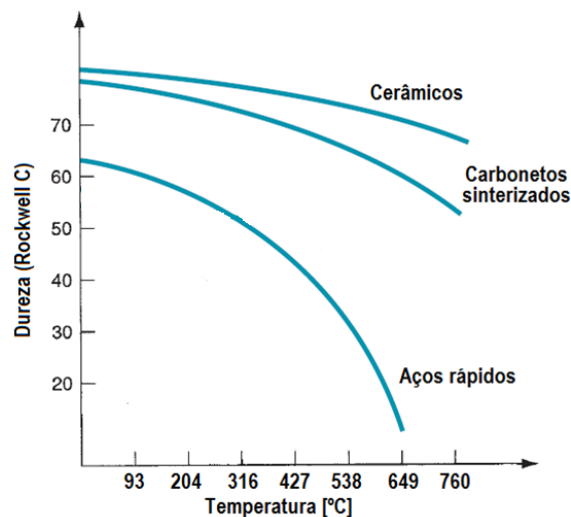


Figura 2.2: Dureza de alguns materiais de ferramentas em função da temperatura de trabalho (adaptado de [9])

2.2.1.1 Aços rápidos

Os aços rápidos são aços com elevada percentagem de elementos de liga na sua composição cujo objetivo é permitir uma maior dureza a quente, necessitando contudo de tratamentos térmicos. Considerando o seu principal elemento de liga, os aços rápidos podem subdividir-se em duas categorias: os aços ao Molibdénio (Grupo M, Mo: 10 a 20% da composição) e os aços ao Tungsténio (Grupo T, W: 5 a 10% da composição) [9].

O fabrico dos aços rápidos pode ainda ser feito recorrendo à pulverometalurgia (PM), o que permite um maior controlo do seu resultado final, isto é, enquanto que os métodos convencionais geram alguma heterogeneidade na estrutura e composição química, a PM é capaz de distribuir os carbonetos de 50 a 500 μm quase homogeneamente. Esta mesma homogeneidade conseguida, confere maior tenacidade ao material [10].

Os aços rápidos apresentam um ótimo compromisso entre tenacidade e resistência ao desgaste e mantêm a sua dureza até aos 400 °C (50-65 HRC). Os aços rápidos são os de mais baixo custo, apresentando no entanto, o menor tempo de vida em trabalho [8].

2.2.1.2 Carbonetos Sinterizados ou Metal Duro (HM)

Sendo a gama de material de ferramentas de corte mais utilizada a nível global, os carbonetos sinterizados destacam-se pelas suas elevadas propriedades de dureza a frio e quente e resistência

ao desgaste. A sua constituição é dada pela ligação de dois elementos [9]:

- Carboneto - elemento que confere a elevada dureza e resistência ao desgaste, frequentemente o carboneto de Tungstênio (WC). O tamanho dos grãos pode variar entre os 0.5 e os 5 μm , permitindo a variação do tamanho do grão afinar as propriedades mecânicas relevantes;
- Aglomerante - geralmente o cobalto, que apresenta composições entre 3 e 12%, dependendo do tipo de metal duro. Este elemento é aquele que confere a tenacidade ao material da ferramenta.

As propriedades mecânicas do metal duro (resistência ao desgaste, dureza, tenacidade, etc) são função da composição química (% carbonetos vs % aglomerante - Figura 2.3) do material, bem como do tamanho de grão (Figura 2.4), da temperatura e outros parâmetros do processo de sinterização dos pós.

Para além do carboneto de tungstênio, outros carbonetos podem ser usados, conferindo propriedades distintas. Na Tabela 2.2 resumem-se as propriedades mecânicas mais importantes de alguns desses carbonetos e na Figura 2.5 mostra-se a evolução da dureza com a temperatura desses diferentes carbonetos [9, 10].

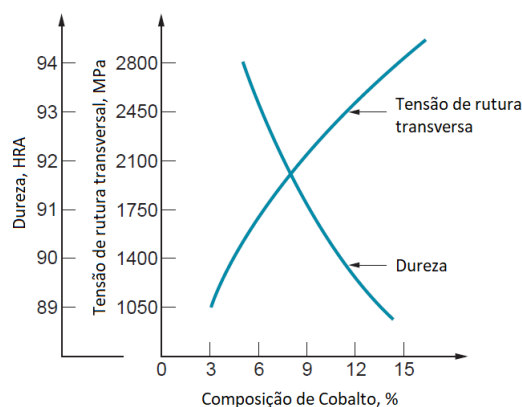


Figura 2.3: Propriedades mecânicas do metal duro função da percentagem de cobalto (adaptado de [9])

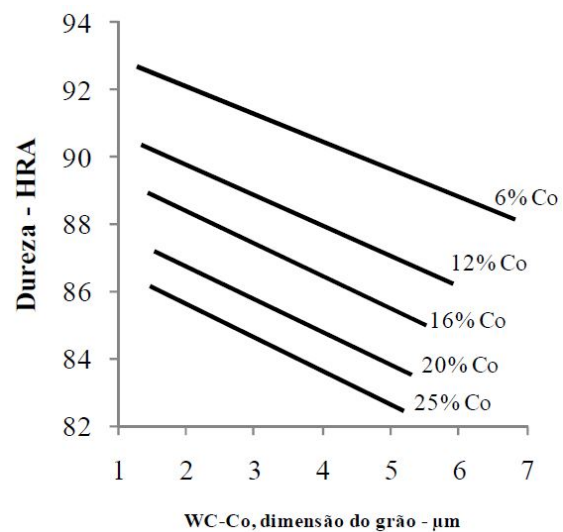


Figura 2.4: Influência do tamanho de grão e percentagem de cobalto na dureza do carboneto sinterizado [13]

Tabela 2.2: Propriedades mecânicas de alguns carbonetos [14]

Material	Dureza HV	Módulo Young GPa	Coef. expansão térmica $\times 10^{-6}/K$	Tenacidade $MPa.m^{0.5}$	Cond. térmica W/mK
WC	3100-3600	600-670	4.5-7.1	7.4-9	28-32
TiC	2500-3200	420-450	6.6-7.4	2.3-2.8	18-25
ZrC	2380-2630	346-430	6.6-6.8	2-3	21-25
NbC	2280-2520	320-340	6.6-7.4	2-3	14-33
TaC	1300-2400	360-375	6.6-7.4	2-3	20-22

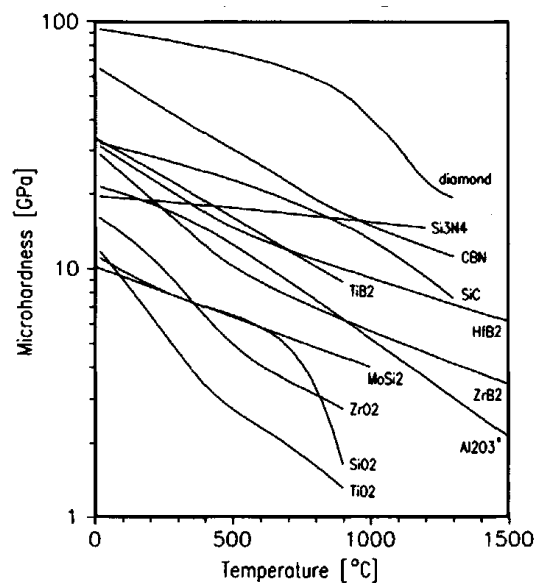


Figura 2.5: Dureza de diferentes carbonetos em função da temperatura [15]

A norma ISO 513 (*International Organization for Standardization*) agrupa diferentes tipos de metal duro consoante a sua aplicação. As suas propriedades são também função dessa mesma utilização e encontram-se discriminadas na Tabela 2.3. As classes de metal duro podem então ser agrupadas em [4, 8, 16]:

- Grupo P: Destina-se à maquinagem de materiais ferrosos, tais como aços ligados ou não, que formem apara longa;
- Grupo M: Aplicação na maquinagem de materiais, tais como aços inoxidáveis, aços endurecidos ou ainda aços com adições de manganês;
- Grupo K: Maquinagem de materiais mais suaves tais como ferros fundidos, não ferrosos (ligas de Al ou Cu) ou mesmo não metálicos (polímeros);
- Grupo N: Materiais não ferrosos tais como alumínio, cobre, latão e suas respectivas ligas;
- Grupo S: Superligas resistentes ao calor, bem como materiais à base de ferro altamente ligados, ligas de níquel, cobalto e titânio;

- Grupo H: Materiais e ligas de elevada dureza, tais como aços endurecidos.

Tabela 2.3: Composição química e propriedades mecânicas de classes de metal duro segundo a norma ISO [10, 11, 16]

Material	Composição química			Dureza HV	Módulo de Young GPa	Coef. expansão térmica x10 ⁻⁶ /K	Cond. térmica W/mK
	%						
P10	55	36	9	1600	520	6.5	6.5
P20	76	14	10	1500	540	6.0	6.0
P30	82	8	10	1450	560	5.5	5.5
P40	77	12	11	1400	560	5.5	5.5
M10	84	10	6	1650	580	5.5	5.5
M20	82	10	8	1550	560	5.5	5.5
M30	81	10	9	1450	580	5.5	5.5
M40	78	7	15	1300	550	5.5	5.5
K10	92	2	6	1650	630	5.0	5.0
K20	91.5	2.5	6	1550	620	5.0	5.0
K30	89	2	9	1450	-	5.5	5.5
K40	88	-	12	1300	580	5.5	5.5

2.2.1.3 Cermets

Este tipo de material advém da combinação de dois materiais, os **cerâmicos** e **metais**. A sua estrutura parte da adição de agregados cerâmicos, sob a forma de carbonetos (TiC, TiN ou TiCN), a uma matriz metálica de cobalto, níquel ou Molibdênio.

As principais vantagens deste material são a sua dureza a quente (agregados cerâmicos sob a forma de carbonetos, durezas $\simeq 2500 - 3000$ HV) e grande estabilidade química, sendo aconselhados para acabamentos com altas velocidades de materiais duros (aços, aços inoxidáveis e ferros fundidos). Apresentam também outras vantagens, nomeadamente resistência à oxidação (derivada da estabilidade química do TiC), dureza a quente (garantida pelo TiC - 3000 HV e Al_2O_3 - 1800 HV) e baixo coeficiente de atrito (presença de TiN) [8–10].

2.2.1.4 Carbonetos Sinterizados Revestidos

Este tipo de material é semelhante aos carbonetos sinterizados, diferindo apenas na aplicação superficial de um revestimento. O revestimento é utilizado com o intuito de conferir dureza superficial, com consequente aumento da resistência ao desgaste e de reduzir a aresta postiça de corte, gripagem e a propagação de fissuras. Os revestimentos possuem ainda um baixo coeficiente de atrito, baixa condutividade térmica e superfícies quimicamente inertes, que permitem a redução de efeitos de adesão, abrasão, oxidação e difusão. A aplicação de revestimentos nas ferramentas não implica alterações das propriedades mecânicas, nomeadamente na tenacidade do substrato, que se mantêm intactas. Existem vários tipos de revestimentos, tais como o carboneto de titânio (TiC), carbonitreto de titânio (TiCN), nitreto de titânio (TiN), entre muitos outros. Os diversos

tipos de revestimentos existentes serão abordados mais à frente na secção 2.2.4, com maior detalhe [5, 8].

2.2.1.5 Cerâmicos

Os materiais cerâmicos existem sob a forma de compostos tais como a alumina (ou óxido de alumínio - Al_2O_3), nitreto de silício (Si_3N_4), SIALON ($\text{SiN} - \text{Al}_2\text{O}_3$) ou cerâmicos reforçados com fibras de carboneto de silício ou também designados de *whiskers* (monocristais de elevada resistência mecânica com diâmetro entre 0.1 a 1 μm e comprimento entre 5 a 50 μm , representam cerca de 10 a 20 % da composição). As suas propriedades mecânicas mais importantes são apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Propriedades mecânicas de cerâmicos [14]

Material	Dureza HV	Cond. térmica $\times 10^{-6}/\text{K}$	Coef. expansão térmica W/mK	Tenacidade $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$
Alumina	1860-2160	26.9-29.1	6.2-6.4	4.2
Nitreto de silício	1520-1680	14.4-15.6	3.3	5
SIALON	1650-1890	18-23	3.5	5.1
Fibras de SiC	120-150	115-140	17	19

A alumina apresenta uma boa condutividade térmica, tendo contudo um razoável coeficiente de expansão térmica. O nitreto de silício e os SIALON's embora apresentem um bom coeficiente de expansão térmica, não apresentam tão boa condutividade térmica quanto a alumina. A tenacidade nesta classe de materiais não é elevada, pelo que a junção de fibras de SiC a nitretos e óxidos procura ultrapassar esta dificuldade, conferindo um aumento significativo de tenacidade ao substrato.

No geral, os cerâmicos são materiais que conservam a sua dureza a temperaturas superiores a 1000 °C, são quimicamente pouco reativos e são utilizados em aplicações que exijam grandes velocidades de corte. A evolução das máquinas-ferramenta capazes de maquinar com elevadas velocidades de corte e com rigidez cada vez maiores, tem também auxiliado à penetração destes materiais no mercado das ferramentas de corte e à sua evolução.

A grande aplicação dos cerâmicos é na maquinagem de materiais resistentes ao calor (ligas HRSA), ferros fundidos e aços muito duros, havendo sempre uma especial atenção ao seu tipo de aplicação e manuseamento, pois são materiais bastante frágeis [9, 10].

2.2.1.6 CBN e PCD

Existem dois tipos de materiais ultra-duros, são eles o diamante policristalino (PCD) e o nitreto de Boro cúbico (CBN).

O CBN é um material exceccionalmente duro ($\text{HB} \simeq 4500 \text{ kg/mm}^2$) cuja aplicação se centra essencialmente em superligas de níquel e aços de elevada dureza, utilizado a rotações elevadas (elevado desgaste com baixas velocidades). A utilização do CBN é para materiais cuja dureza seja

superior a 45 HRC. Uma vantagem deste material é a elevada condutividade térmica que permite um fácil escoamento do calor do processo através da ferramenta. Outra vantagem deste material em relação ao PCD é o facto de ser bastante estável quimicamente, não reagindo com o Carbono presente em aços e ferros fundidos [4].

O PCD, analogamente, é um material com excecional dureza ($HB \simeq 10000 \text{ kg/mm}^2$). A sua aplicação é feita sob a forma de uma fina placa de espessura, entre 0.5 e 1 mm, composta por partículas entre os 10 e os 40 μm , sinterizadas sobre um substrato de metal duro pré-sinterizado. A sinterização é feita com altas pressões e temperaturas, na ordem dos 6 GPa e a 1500 °C, respetivamente. A sua utilização é limitada maioritariamente a alumínio, pois é solúvel nos aços e em materiais com carbono devido à sua grande afinidade química. O PCD apresenta uma resistência excecional ao desgaste e pode ser aplicado com velocidades de corte desde os 100 m/min. A Tabela 2.5 resume algumas propriedades mecânicas dos materiais CBN e PCD [4, 8, 10, 17].

Tabela 2.5: Propriedades mecânicas dos materiais ultra-duros [10]

Material	PCD	CBN
Dureza a 25°C (HV)	5000-6000	3500-4000
Condutividade térmica (W/mK)	550	100
Módulo Young (GPa)	8.4	6.8
Coef. expansão térmica ($\times 10^{-6}/\text{K}$)	1.5	4.9

2.2.2 Vida das Ferramentas

São vários os fatores que afetam a performance do processo de maquinagem, como anteriormente mencionado. De forma a poder melhorar este mesmo processo, nomeadamente o desempenho das ferramentas, é necessário saber onde ocorrem as falhas nestas (Figura 2.6), que tipos de falhas existem e a sua causa (Figura 2.7) [9, 10].

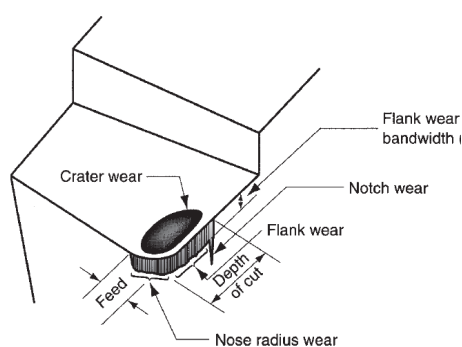


Figura 2.6: Zonas de desgaste de ferramenta monofilar [9]

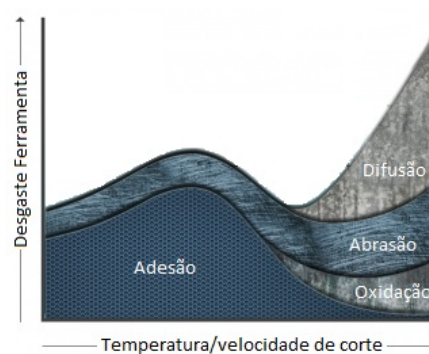


Figura 2.7: Fenómenos de desgaste originados pela interação ferramenta-material (adaptado de [18])

Essencialmente as falhas nas ferramentas ocorrem em dois locais, ou no flanco ou na face de ataque (Figura 2.6). Quanto às falhas mais típicas, estas ocorrem como sendo fratura da ferramenta, devido a esforços de corte elevados para a ferramenta em questão ou heterogeneidades no

material (pontos duros); amaciamento do material (devido à falta de lubrificação e/ou desajustes nos parâmetros de corte) que levam à perda do poder de corte da ferramenta (desafamento da aresta de corte) por aquecimento excessivo; desgaste normal devido à utilização da ferramenta de corte que leva à diminuição progressiva do poder de corte e/ou perda progressiva da aresta de corte [9, 10].

A causa do desgaste, originado pela interação ferramenta-material, deve-se então a fenómenos tais como:

1. Abrasão: erosão de pequenas partículas na ferramenta provocada por contacto com carbonetos ou outros compostos duros na peça e com a apara;
2. Adesão: entendida por vezes como soldadura, ocorre devido às elevadas temperaturas e/ou pressões que por vezes ocorrem na interface ferramenta-peça, dependentes estas também do material a maquinar;
3. Difusão: transferência de átomos entre os materiais intervenientes do processo. Frequentemente, esta troca remove os elementos da ferramenta que lhe conferem dureza;
4. Deformação plástica: a ocorrência de altas temperaturas pode originar a plastificação da aresta de corte e maior suscetibilidade à abrasão;
5. Oxidação: formação de uma camada de óxidos na superfície da ferramenta com consequente perda de poder de corte.

O desgaste das ferramentas de corte, está intrinsecamente ligado ao material que compõe as mesmas, facto ilustrado na Figura 2.8, que compara o tempo de vida de vários materiais de ferramentas. Como visto anteriormente, os aços rápidos são a categoria de materiais com o tempo de vida mais curto, seguidos dos carbonetos e cermet, para os mesmos parâmetros de corte e materiais a maquinar. Os carbonetos revestidos e os cerâmicos são a gama de materiais para ferramentas de corte com maior tempo de vida, tendo em conta as suas propriedades.

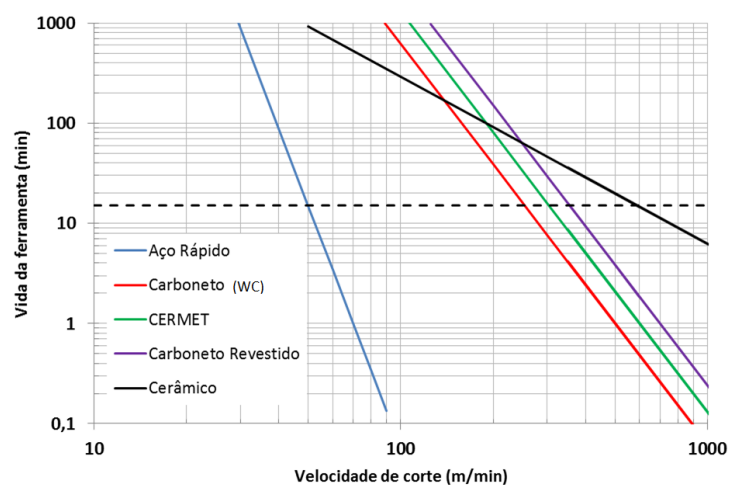


Figura 2.8: Resistência ao desgaste e tempo de vida dos materiais de ferramentas (adaptado de [9])

O desgaste das ferramentas é inevitável e, para além do material das ferramentas, um outro modo de o minimizar, é a utilização de parâmetros de corte adequados ao processo. A Figura 2.9 ilustra o desgaste de uma ferramenta de corte, sujeita a vários parâmetros de corte diferentes onde, para parâmetros de corte mais agressivos, se têm maiores níveis de desgaste nas ferramentas.

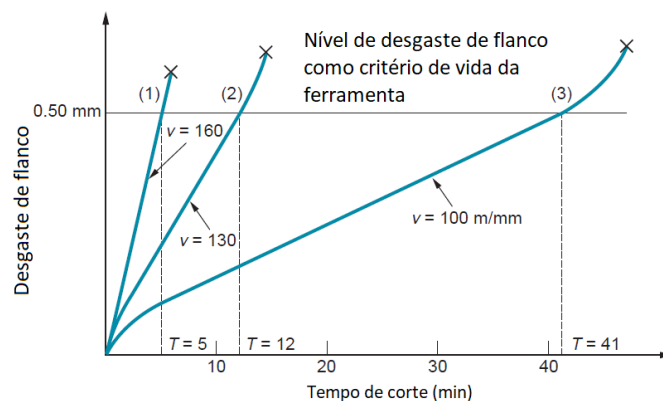

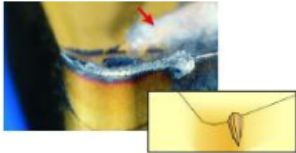
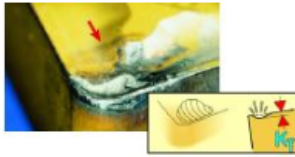


Figura 2.9: Efeito da velocidade de corte no desgaste de flanco para três velocidades diferentes. Valores hipotéticos de velocidade e de tempos de vida de uma ferramenta são representados (adaptado de [9])

A Figura 2.11 ilustra diversos tipos de falhas, causas e soluções a adotar para as evitar, de acordo com a informação disponibilizada por uma multinacional produtora de ferramentas de corte:

	Causa	Solução
Desgaste de flanco  <p>Tipo de desgaste preferido em todas as aplicações Proporciona vida útil da ferramenta previsível e estável.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de corte muito alta • Classe muito tenaz • Resistência ao desgaste insuficiente • Falta de refrigeração. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduza a velocidade de corte • Selecione uma classe mais adequada de acordo com a exigência por tenacidade ou resistência ao desgaste • Adicione refrigeração.
Desgaste tipo entalhe 	<ul style="list-style-type: none"> • Materiais pastosos e/ou endurecidos por trabalho • Uso de ângulo de posição de $\sim 90^\circ$ • A geometria é muito negativa 	<ul style="list-style-type: none"> • Selecione uma aresta mais viva • Diminua o ângulo de posição • Selecione uma classe com cobertura CVD, ex. 4325 (para maior resistência ao desgaste) • Selecione uma classe com cobertura PVD, ex. 1125 (para resistência à escamação e aresta postiça) • Varie a profundidade de corte.

Craterização

- Velocidade de corte e/ou avanço muito alto
- Classe muito tenaz
- Quebra-cavacos muito estreito
- Reduza a velocidade de corte ou o avanço
- Selecione uma classe mais resistente ao desgaste
- Selecione uma geometria mais aberta/positiva.

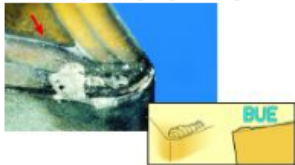
Deformação plástica, depressão/impressão

Depressão

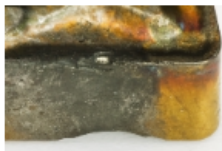


Impressão

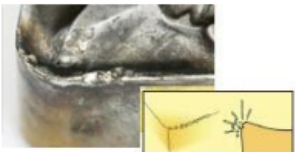
- Carga de calor e pressão altas, temperatura de corte muito alta
- Classe muito tenaz
- Falta de refrigeração
- Diminua a carga de calor e pressão reduzindo a velocidade de corte e/ou avanço
- Se houver depressão da aresta, reduza o avanço primeiro
- Se houver depressão do flanco, reduza a velocidade primeiro
- Selecione uma classe mais resistente ao desgaste/calor
- Selecione uma geometria mais aberta/positiva
- Melhore a refrigeração.

Aresta postiça (B.U.E)

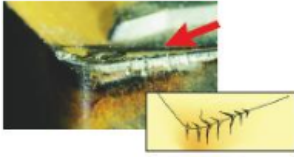
- Temperatura de corte muito baixa
- Solda do cavaco na pastilha
- Material pastoso
- Geometria muito negativa
- Aumente a temperatura de corte aumentando a velocidade ou o avanço
- Selecione uma classe com cobertura PVD, ex. 1125 (menos arestas postiças nas coberturas PVD)
- Selecione uma geometria mais positiva.

Lascamento fora da zona de corte

- Entupimento de cavacos devido à usinagem de encontro a cantos a 90 graus
- Os cavacos são desviados contra a aresta de corte
- Direção do avanço ou avanço não otimizados
- Mude o percurso da operação (para evitar ir de encontro a cantos a 90°)
- Mude o avanço
- Mude para uma classe PVD, ex. 1125
- Selecione uma geometria de pastilha que altere o fluxo dos cavacos.

Lascamento na aresta

- Condições instáveis
- Classe muito dura/quebradiça
- Torne as condições da máquina mais estáveis
- Selecione uma classe mais tenaz
- Selecione uma geometria mais robusta

Fissuras térmicas

- Temperaturas variadas na aresta de corte
- Refrigeração e cortes intermitentes
- A classe é sensível a variações de temperatura
- Desligue a refrigeração ou aplique refrigeração constante para obter um nível de temperatura uniforme
- Reduza a velocidade de corte

Fratura em camadas - cerâmica

- Pressão da ferramenta excessiva.
- Reduza o avanço.
- Selecione uma classe mais tenaz.
- Selecione uma pastilha com chanfro menor ou use outra geometria para mudar a direção da força de corte.

Figura 2.11: Tipos de desgaste de ferramentas, causas e soluções [4]

2.2.2.1 Lei de Taylor

O tempo de vida de uma ferramenta é variável e depende de vários fatores, como visto anteriormente. O tempo de vida de uma ferramenta é o tempo de corte ou de trabalho durante o qual, o resultado da sua utilização continua a ser o pretendido para o objeto a maquinar. De entre vários critérios utilizados para a determinação da vida de uma ferramenta destacam-se dois. O primeiro, e mais usual, pode ser definido como um nível de desgaste que, quando atingido, considera-se a ferramenta gasta, necessitando de substituição. A Figura 2.9 ilustra esse mesmo princípio, com um critério que pode, neste caso, ser de por exemplo 0.5 mm de desgaste de flanco. Um outro critério, menos usual, pode ser definido como o tempo de vida necessário para que a ferramenta sofre fratura de uma ou mais arestas de corte [9].

Como é possível de verificar na Figura 2.9, para diferentes velocidades de corte existem diferentes taxas de desgaste e, consequentemente, tempos de vida distintos. De notar ainda que, quando maior for a velocidade, menor será o tempo de vida. As curvas representadas a azul na Figura 2.9 demonstram também uma taxa de desgaste inicial mais elevada após a qual, a taxa de desgaste mantém um crescimento estável.

Apesar de o desgaste ser mais acentuado com velocidades de corte mais elevadas, na prática é feito sempre um balanceamento entre o desgaste das ferramentas e as taxas de produção, optando-se sempre pela solução mais económica [9].

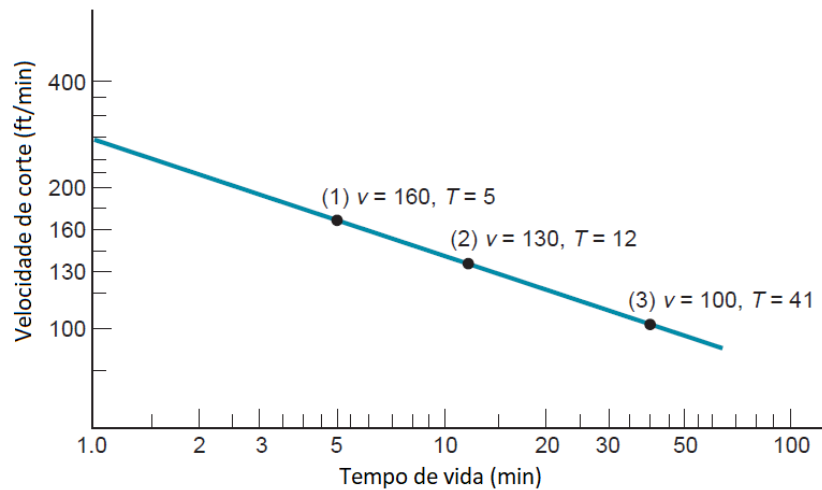


Figura 2.12: Relação entre a velocidade de corte e o tempo de vida de uma ferramenta (adaptado de [9])

A Figura 2.12 ilustra a relação entre a velocidade de corte e o tempo de vida de uma ferramenta, também conhecida como Lei de Taylor. Esta relação pode ser expressa matematicamente por:

$$V_c T^n = C \quad (2.1)$$

sendo:

V_c – velocidade de corte [m/min];

T – tempo de vida [min];

n e C são constantes que dependem do material da ferramenta, do material a maquinar e das condições de corte; n representa o declive e é praticamente constante e C representa a velocidade de corte que conduz a uma vida da ferramenta de um minuto.

De notar que a equação 2.1 é um pouco simplificada, tendo em conta os inúmeros fatores que influenciam a vida das ferramentas (tais como dureza do material a maquinar, avanço e profundidade de corte). No entanto, essa mesma relação, pode ser mais desenvolvida e completa, incorporando outras variáveis do processo, através da seguinte equação:

$$V_c T^n f_n^m a_p^p = K T_{ref}^n f_{n\ ref}^m a_{p\ ref}^p \quad (2.2)$$

onde:

f_n - avanço [mm];

a_p - profundidade de corte [mm];

T , f_n e a_p são valores de referência para tempo, avanço e profundidade de corte, respetivamente;

m e p são expoentes determinados experimentalmente e K é uma constante análoga ao parâmetro C na equação 2.1. De notar ainda que, a equação 2.1 realça a maior influência da velocidade

de corte na vida da ferramenta. Na equação 2.2 não está implícita a contribuição da dureza do material nem da refrigeração utilizada, bastante relevantes no processo.

2.2.3 Geometria

A geometria das ferramentas de corte desempenha um papel importante na operação de maquinagem. Os parâmetros de corte, revistos mais adiante, dependem também da geometria da ferramenta, pois é necessário adequá-los à geometria das ferramentas. Quanto à sua construção, as arestas de corte (parte ativa da ferramenta) podem aparecer sob a forma de:

- Pastilhas ou insertos ou plaquetas: componente bastante prático e simples de manusear, facilmente adaptável a vários tipos de materiais. A sua desvantagem prende-se com a necessidade de substituição do corpo da ferramenta, caso o perfil a maquinar se altere (Figura 2.13);
- Integrais: as ferramentas são feitas, usualmente, a partir de um varão, do material pretendido para a ferramenta (geralmente *HM* ou *HSS*); maioritariamente são ferramentas de construção simples (Figura 2.14);
- Insertos brazados: com grande durabilidade e possibilidade de geometrias muito complexas, os insertos são geralmente em *HM*. Apresentam no entanto custos de fabrico consideráveis (Figura 2.15).

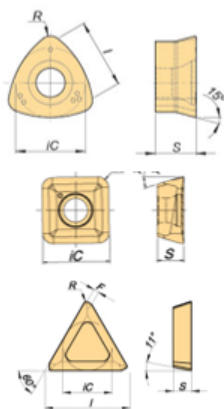


Figura 2.13: Pastilhas para ferramentas de corte [19]



Figura 2.14: Ferramentas de corte integrais - brocas [20]



Figura 2.15: Ferramenta com insertos soldados [21]

Quanto ao seu tipo de construção, as ferramentas podem ainda ser classificadas de um outro modo, ou de ferramentas *standard* ou de ferramentas especiais. As ferramentas *standard* (Figura 2.14), como o nome indica, são ferramentas standardizadas em que embora o seu custo seja relativamente baixo, existe alguma limitação geométrica. Por outro lado, as especiais (Figuras 2.16 e 2.17) permitem outro tipo de geometrias e complexidade tendo por consequência custos associados mais elevados.



Figura 2.16: Ferramenta de corte especial com plaquetas [22]



Figura 2.17: Ferramenta de corte com suporte incorporado [23]

A estrutura da ferramenta pode apresentar-se sob duas formas distintas, sem suporte incorporado ou com suporte. As ferramentas sem suporte são mais versáteis, pois podem ser utilizadas em suportes diferentes tendo, contudo, o inconveniente de poder acumular resíduos de limalha e/ou outros na junção suporte/ferramenta. As ferramentas com suporte incorporado têm um custo mais elevado (1.5 a 2 vezes o valor de ferramentas sem suporte incorporado) mas, para além de não apresentarem junções e com isso terem a possibilidade de acumular resíduos, constituem um só corpo, produzindo com isso menos vibrações em trabalho.

A disposição das arestas de corte, qualquer que seja o seu tipo de construção, pode ser diferente, podendo mesmo variar de fabricante para fabricante. A seguinte figura ilustra a disposição de alguns ângulos característicos de uma ferramenta:

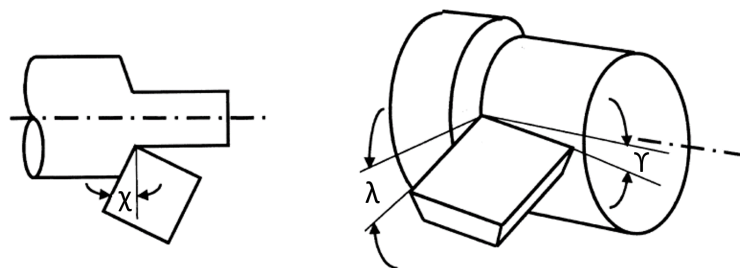


Figura 2.18: Representação esquemática de ângulos característicos de uma ferramenta de corte em torneamento cilíndrico; χ - ângulo de posição, γ - ângulo de ataque, λ - ângulo de inclinação (adaptado de [24])

O ângulo de posição da aresta de corte determina o comprimento de contacto da ferramenta com o material base a maquinar. Quanto menor for o ângulo de posição, maior será então a extensão de contacto (Figura 2.19) e melhor a distribuição de calor por essa mesma extensão. A solicitação da ferramenta por unidade de comprimento diminui, permitindo também um aumento da vida da ferramenta [10].

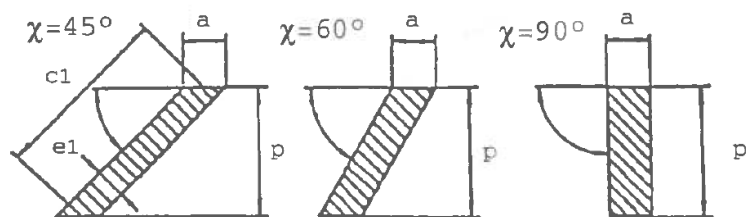


Figura 2.19: Variação da geometria da apara em função do ângulo de posição da aresta de corte, χ [10]

O ângulo de ataque (γ) influencia bastante os esforços da ferramenta e a formação da apara. Quanto menor é o ângulo de ataque, menor é também a deformação induzida na apara e, conseqüentemente, menor é o trabalho necessário para a formar (Figura 2.20) [10].

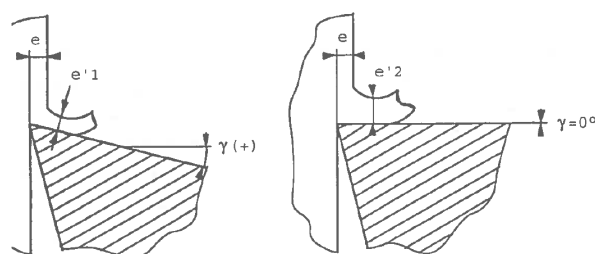


Figura 2.20: Esquema da deformação da apara e influência do ângulo de ataque, γ [10]

O ângulo de saída ou folga (α) é sempre positivo (Figura 2.21) e o seu valor é de, geralmente, 2 a 8°. Se o ângulo for muito pequeno (inferior a 2°), a interferência entre a face de saída principal e a superfície maquinada é grande, causando muito desgaste na ferramenta. Se o ângulo for superior a 8°, o gume perde alguma resistência, podendo até originar a fratura do mesmo [10].

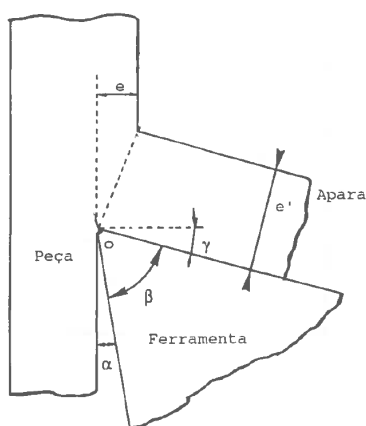


Figura 2.21: Representação esquemática do ângulo de saída (α), ângulo de gume (β) e ângulo de ataque (γ) [10]

O ângulo de inclinação, λ , é geralmente negativo, para que o ponto de contacto inicial da ferramenta com a peça não seja feito com a aresta menos tenaz (geralmente a de topo), permitindo

assim uma maior robustez na ferramenta e no processo.

2.2.4 Revestimentos

Em determinados casos, a aplicação de revestimentos nas ferramentas de corte é benéfica. O revestimento é uma camada protetora que se aplica superficialmente quer em ferramentas de corte, quer em elementos mecânicos. Estes são utilizados com o intuito de dotarem a ferramenta de resistência ao desgaste, através de uma grande dureza superficial, ao mesmo tempo que mantêm a tenacidade do substrato. Simultaneamente, possuem um baixo coeficiente de atrito, baixando as forças de corte e o calor gerado (Figura 2.22) e conferem também um melhor acabamento superficial. Necessitam, contudo, de ser quimicamente inertes em relação ao material a maquinar.

O domínio deste tema implica um conhecimento multidisciplinar, sendo necessário perceber quais as interações entre as propriedades químicas, físicas e tribológicas. Estes materiais não são aplicados no substrato da ferramenta pois são bastante frágeis. Esta tecnologia é aplicada essencialmente em carbonetos sinterizados (*HM*), podendo também ser aplicados em HSS, cermets e cerâmicos.

Uma outra finalidade do revestimento é o isolamento térmico entre a ferramenta e o material a maquinar. Este fator permite que o calor gerado no processo seja transferido para a limalha, ao invés deste ser transmitido para a própria ferramenta, maximizando assim a eficiência do processo (Figura 2.22).

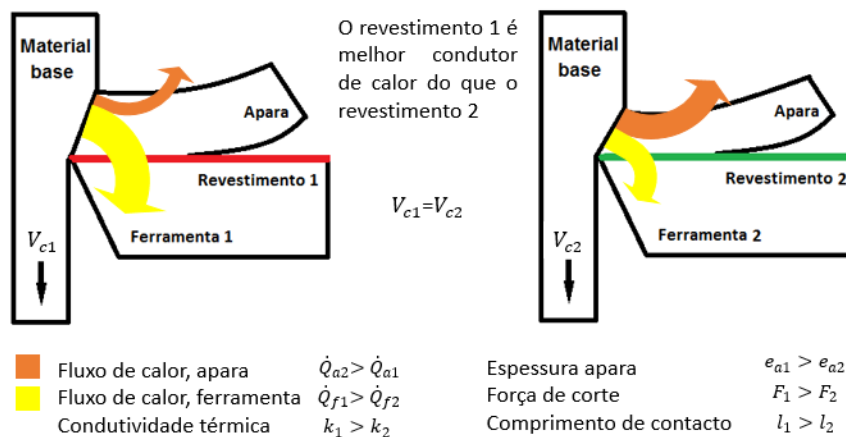


Figura 2.22: Condições de contacto no processo de arranque de apra dependendo das condutividades térmicas dos revestimentos (adaptado de [25])

Atualmente existem diversas tecnologias de revestimentos, tais como:

CVD (Chemical Vapour Deposition): deposição química por vapor, resultante de uma reação química entre o elemento vaporizado e o substrato, que se dá entre os 700 e os 1050 °C . Este tipo de revestimento confere grande resistência ao desgaste, bem como possui uma excelente adesão ao metal duro (substrato da ferramenta). Este tipo de revestimentos é aplicado quando o desgaste tem grande influência no desgaste da ferramenta, ou seja, são utilizados em aplicações severas

com velocidades de corte e avanços elevados. O CVD é utilizado para maquinar as classes de aços inoxidáveis, e de fresagem ISO M, P e K [4];

PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition): processo similar ao CVD que utiliza plasma para decompor gases complexos em compostos químicos prontos a serem utilizados para o revestimento [26];

FCVA (Filtered Cathodic Vacuum Arc): este processo tecnológico consiste numa filtragem eletromagnética dos compostos que serão aplicados na película de revestimento. A remoção de impurezas destes compostos permite a obtenção de revestimentos mais densos e duros. Este processo pode produzir revestimentos de TaC ou mesmo Al_2O_3 [27];

PVD (Physical Vapour Deposition): tecnologia de deposição física de vapor a temperaturas moderadas (400-600 °C). O processo consiste na evaporação de um elemento metálico, através de um arco elétrico de elevada potência, que reage, por exemplo, com o Nitrogénio formando uma película dura à superfície da ferramenta (nitreto). A evaporação dá origem a uma condensação desse mesmo material sobre o substrato que se pretende revestir, formando a camada de proteção superficial. A vantagem deste tipo de revestimento é o incremento da resistência ao desgaste, bem como a tenacidade da aresta de corte conferida pelo substrato. Os revestimentos mais comuns são os nitretos de titânio (TiN), titânio/alumínio (TiAlN) ou ainda os carbonitretos de titânio (TiCN), aplicados em situações onde a adesão é um fator crítico. Contrariamente ao CVD, os revestimentos em PVD são empregues quando as aplicações são de moderadas velocidades de corte e baixos avanços. A Figura 2.23 ilustra a relação entre a dureza e a espessura de deposição para diferentes materiais de revestimento [4, 28];

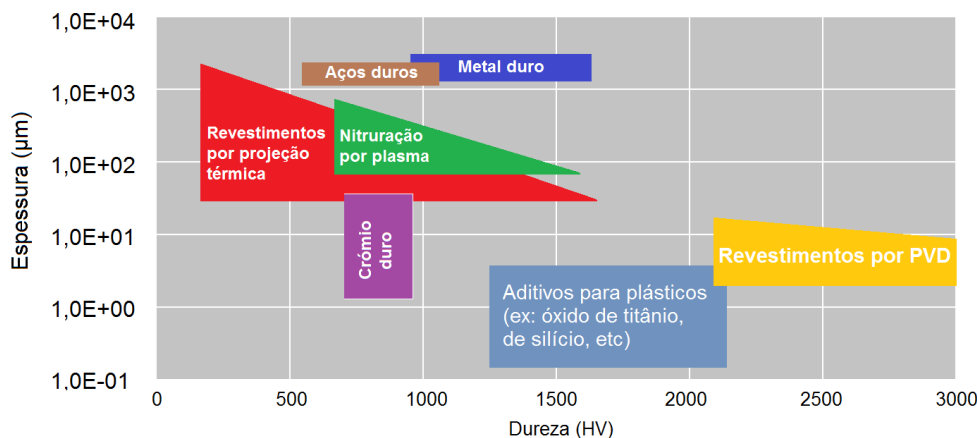


Figura 2.23: Dureza de diferentes materiais consoante a espessura (adaptado de [28])

HiPIMS (High-Power Impulse Magnetron Sputtering): este método é semelhante ao PVD, mas cuja tecnologia utiliza elevados impulsos magnéticos, permitindo uma maior taxa de ionização e consequente deposição. Os revestimentos são de qualidade superior devido à alta densidade de deposição (Figuras 2.24 e 2.25) e à estrutura quase amorfa resultante, que conferem uma maior dureza e tenacidade [29].

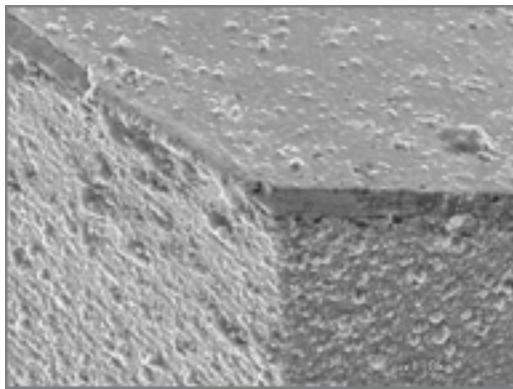


Figura 2.24: Revestimento usual [29]

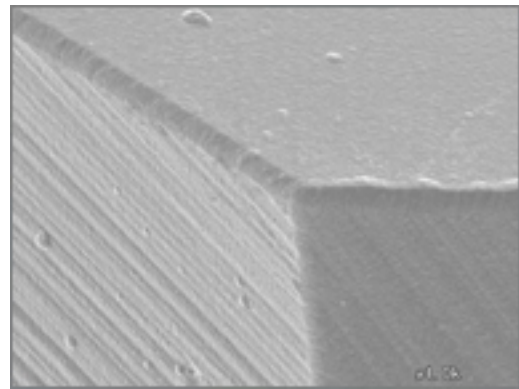


Figura 2.25: Revestimento HiPIMS [29]

Existem diversos materiais, estruturas e espessuras para revestimentos e são aplicados consoante o material e o tipo de ferramenta. Quanto aos materiais dos revestimentos, estes podem ser de [4, 5, 25, 28–38]:

- **Al_2O_3** - Elevada dureza, boa resistência ao desgaste, quimicamente inerte e com baixa condutividade térmica, tornando-o resistente à formação de crateras;
- **$AlCrN$** - Elevada resistência ao desgaste, baixo coeficiente de atrito e dureza a quente;
- **$AlTiN$** - Adequado para aplicações que envolvam altas temperaturas (boa resistência à oxidação), grande dureza a quente, dúctil e baixo condutor térmico;
- **CrN** - Boa combinação de resistência ao desgaste abrasivo, corrosão e oxidação, baixo coeficiente de atrito e boa tenacidade e ductilidade;
- **Diamante** - Elevada dureza, elevada resistência ao desgaste, difusão química com materiais que contenham carbono, pouca adesão ao substrato. Este tipo de revestimento é aplicado na maquinação de cobre, latão e titânio e suas ligas e ainda em polímeros técnicos;
- **NbC** - Aplicado em carbonetos sinterizados com a vantagem de conferir dureza a quente, resistência ao desgaste e resistência química;
- **PCD** - Elevada dureza e resistência ao desgaste, contudo apresenta alguma difusão química com materiais que contenham carbono;
- **TaC** - Aplicado em carbonetos sinterizados com a vantagem de conferir dureza a quente, resistência ao desgaste e resistência química;
- **$TiAlN$** - Semelhante ao revestimento $AlTiN$ com uma dureza ligeiramente inferior, possui no entanto uma maior dureza em combinação com resistência à oxidação, melhorando a resistência geral ao desgaste;
- **TiB_2** - possui fraca microestrutura e grande porosidade, utilizado com outros compostos tais como TiC de modo a melhorar as suas propriedades;

- **TiC** - Apresenta boa resistência ao desgaste, elevada dureza, e boa estabilidade química sendo aplicado em carbonetos sinterizados;
- **TiCN** - Boas propriedades de adesão, baixa lubrificação necessitando, contudo, de uma camada resistente ao calor para fazer face ao sobreaquecimento (por exemplo o Óxido de alumínio). O TiCN é aplicado em materiais difíceis de maquinar tais como aços rápidos, aços de dureza superior a 40 HRC e materiais abrasivos e adesivos. O carbonitreto de titânio é mais duro do que TiN e agrega resistência ao desgaste de flanco;
- **TiHfCN** - Propriedades semelhantes aos revestimentos de TiN e TiC, tendo no entanto um maior ponto de fusão e consequente melhor estabilidade térmica e resistência ao desgaste, com baixa difusividade térmica;
- **TiN** - Utilização universal, material com uma dureza inferior aos restantes mas com coeficiente de atrito relativamente baixo, diminuindo crateras de desgaste;
- **TiSi** - Composto de elevada dureza e alto coeficiente de atrito, entre 0.75 e 0.8;
- **ZrN** - Similar ao revestimento TiN possuindo, no entanto, maior poder lubrificante, reduz o desgaste abrasivo e é quimicamente muito resistente.

De notar ainda que um mesmo material pode ser aplicado por diferentes técnicas, como é o caso do TiN, que pode ser aplicado quer por CVD quer por PVD.

As estruturas de revestimentos podem ser aplicadas sob a forma de monocamada, multicamadas (camadas de materiais diferentes) ou laminar (várias camadas do mesmo material). A existência de diferentes tipos de camadas (multicamadas) existe para poder combinar as melhores propriedades dos diversos tipos de revestimentos, que são dependentes também da ferramenta, do material a maquinar e do tipo de maquinagem. A espessura do revestimento aplicado deverá estar compreendida entre 1 e 10 μm , não devendo ultrapassar os 10 μm , dado que a sua fragilidade aumenta consideravelmente, embora se aumente a resistência ao desgaste. O aumento da temperatura de deposição resulta numa maior espessura de revestimento e, consequentemente, maior compactação do filme, aumentando assim a dureza. Um material por si só não consegue melhorar todos os tipos de resistência ao desgaste na ferramenta pelo que, uns são mais indicados do que outros, tendo em conta o tipo de aplicação (Figura 2.26).

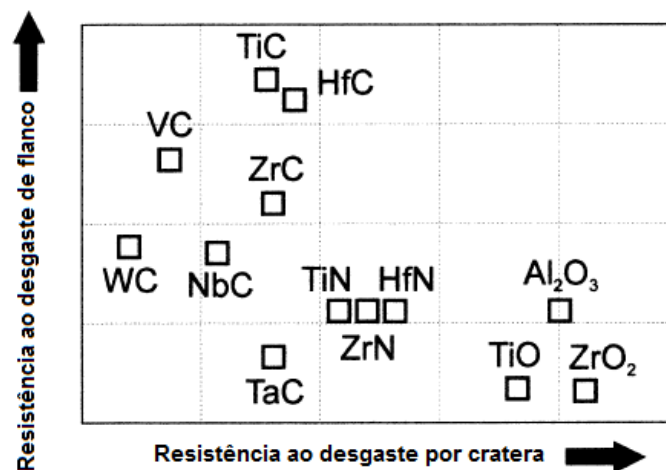


Figura 2.26: Resistência ao desgaste de flanco e por cratera de diferentes materiais do revestimento [36]

Embora se possa afirmar que um dado revestimento tem elevada dureza a quente ou não, é necessário quantificar esses mesmos valores. De igual forma, é também de notar que a dureza de um dado revestimento é função da temperatura a que este trabalha. Ou seja, para diferentes temperaturas de trabalho, existem diferentes durezas para um revestimento.

Tendo já resumido algumas propriedades dos diversos revestimentos, na escolha do revestimento é necessário analisar quais as propriedades requeridas para fazer a melhor escolha possível, já que não existe um só revestimento que combine todas as pretendidas. Sabendo que os revestimentos são aplicados com recurso à elevação da temperatura, nalguns casos é de interesse que a aplicação não seja feita a elevadas temperaturas, pois pode induzir modificações no substrato (variações geométricas e/ou químicas). Contudo, todos os substratos metálicos devem, antes de serem revestidos, sofrer um processo de revenido para prevenir estes mesmos erros [28].

2.3 Operações, Parâmetros e Fluidos de Corte

2.3.1 Operações

No que à maquinagem convencional diz respeito, existem diversos processos de remoção de material, cada um com as suas especificidades e adequações, tendo todos em comum o processo de remoção de apara do material. Para a remoção da apara é necessário haver um movimento relativo entre a ferramenta e a peça, caracterizado por uma velocidade de corte (V_c) e um avanço (f). Os principais processos de maquinagem estão representados na Figura 2.27 e são eles o torneamento, a furação e a fresagem.

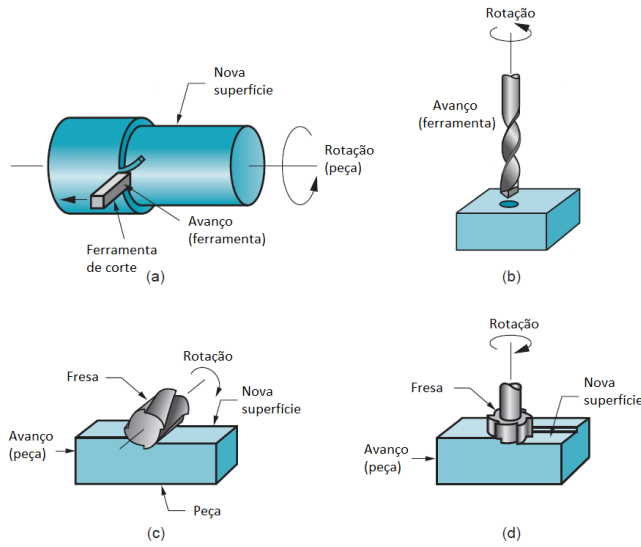


Figura 2.27: Principais operações de maquinagem convencional: (a) torneamento, (b) furação, (c) e (d) fresagem (adaptado de [9])

2.3.2 Parâmetros de Corte

Os parâmetros de corte são extremamente importantes no processo de maquinagem, visto que têm influência nos três elementos-chave, máquina-ferramenta, ferramenta e material a maquinar. Como referido anteriormente, o processo de maquinagem envolve um grande número de variáveis, pelo que nem sempre é fácil otimizá-las (ferramenta, parâmetros de corte, material base, etc.). Aquando de uma operação de maquinagem é necessário definir a solução que maximiza a produtividade em função dos custos e da qualidade superficial pretendida. Será sempre obrigatória a definição de pelo menos dois parâmetros de corte independentes (exemplo: velocidade de corte, V_c , e avanço, f_n). No caso de uma operação de fresagem, podem definir-se as seguintes relações entre os parâmetros de corte:

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi D} \quad [rot/min] \quad (2.3)$$

$$V_f = f_z \cdot n \cdot z \quad [mm/min] \quad (2.4)$$

$$t = \frac{l}{n \cdot f_n} \quad [s] \quad (2.5)$$

Onde o volume de material removido pode ser deduzido através da Equação 2.6:

$$V = ar \cdot a_p \cdot V_f = V_c \cdot a_p \cdot f_n \quad [cm^3/min] \quad (2.6)$$

com:

a_p = profundidade de corte [mm]

a_r = largura fresada [mm]

D = diâmetro de corte [mm]

f_n = avanço por rotação [mm/rot]

f_z = avanço por aresta ou dente [mm/aresta]

l = comprimento de maquinagem [mm]

n = frequência de rotação [rot/min]

t = tempo de maquinagem [s]

V = taxa de remoção de material [cm³/min]

V_c = velocidade de corte (periférica) [m/min]

V_f = velocidade de avanço [mm/min]

z = número de arestas de corte ou dentes da fresa

Tendo em conta estas parametrizações, pode inferir-se que para operações de desbaste exigindo maiores esforços, são aplicadas menores velocidades de corte e profundidades de corte maiores, enquanto que, para operações de acabamento, são aplicadas maiores velocidades de corte e profundidades de corte menores [9].

Para a escolha propriamente dita dos parâmetros de corte é necessário ter em conta vários fatores, desde a geometria a maquinar, o tipo de operação, o material a maquinar e a ferramenta. Quanto à ferramenta, existem dois parâmetros muito importantes, são eles o tempo de vida da ferramenta (Figura 2.9) e o material da mesma.

A Tabela 2.6 exemplifica algumas velocidades de corte para alguns materiais, no caso de uma operação de furação com insertos em metal duro.

Tabela 2.6: Velocidades de corte e avanços para operações de furação [39]

		Diâmetro de furação [mm]			
		≤ 25	25-30	30-40	≥ 40
Material	V_c [m/min]	f_n [mm/rot]			
alumínio e ligas de Al	150-375	0.08-0.11	0.11-0.17	0.17-0.27	0.17-0.27
Latão, Bronze e cobre	80-160	0.09-0.15	0.09-0.15	0.15-0.25	0.15-0.25
ferro Fundido	80-190	0.1-0.16	0.15-0.22	0.16-0.25	0.18-0.3
Aço com baixo carbono	90-250	0.04-0.12	0.09-0.19	0.11-0.2	0.14-0.25
Aço inox	80-170	0.04-0.12	0.1-0.16	0.11-0.18	0.12-0.18

2.3.3 Forças e Potências de Maquinagem

2.3.3.1 Forças

Do contacto da peça com a ferramenta resulta a formação de uma força de contacto, responsável pelo arranque de aparas e consequente maquinagem da peça. Embora a maquinagem advinha do movimento relativo entre a peça e uma ferramenta, por simplificação da análise do processo

considera-se esse ponto constante no tempo e, é nesse mesmo ponto, onde são consideradas as forças de contacto resultantes.

A então designada força de contacto pode também ser designada por força de maquinagem (F_m), representada na Figura 2.28 abaixo para uma operação de torneamento cilíndrico, e pode ser decomposta segundo as três direções ortogonais: Força de avanço (F_a ou F_x); Força de corte (F_c ou F_z); Força na direção da profundidade de corte (F_p ou F_y).

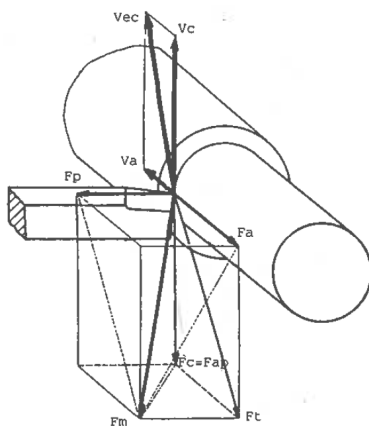


Figura 2.28: Componentes da força de maquinagem no torneamento cilíndrico longitudinal [10]

$$F_m = \sqrt{F_a^2 + F_p^2 + F_c^2} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (2.7)$$

2.3.3.2 Pressão específica de corte

A pressão específica de corte ou energia específica de corte (K_s) é um dos parâmetros capazes de avaliar a eficiência do processo de corte, sendo definida por:

$$K_s = \frac{F_c}{S} = \frac{F_c}{a_p \cdot f} \quad (2.8)$$

onde F_c é a força de corte e S a secção da apara não deformada dada pelo produto da profundidade de corte, a_p , pelo avanço, f_n .

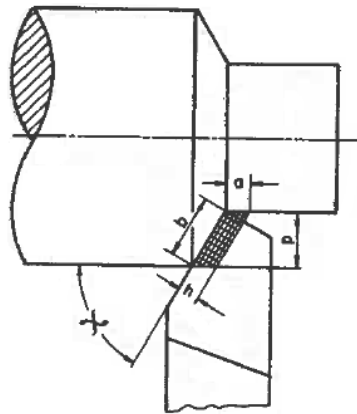


Figura 2.29: Variação da pressão específica de corte, função da força de corte, F_c , com a seção da apara não deformada, S [11]

A pressão específica de corte é inversamente proporcional à área de seção de corte e a sua relação é ilustrada nas seguintes figuras, para o caso de ligas de latão (Figura 2.30, para o caso de torneamento) e para os restantes materiais (Figura 2.31):

Na Figura 2.30 apresentam-se valores de referência da pressão específica de corte para vários materiais, incluindo o latão e aços. Da análise da figura constata-se que a pressão específica de corte não é uma propriedade intrínseca do material, pois mostra uma dependência negativa com a seção da apara, aumentando o seu valor com a redução da seção da apara. Na Figura 2.31 ilustram-se valores de referência da pressão específica de corte para os diferentes grupos ISO de materiais.

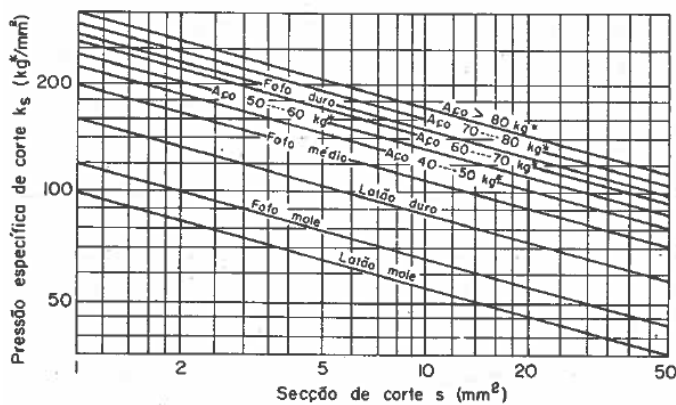


Figura 2.30: Pressão específica de corte em função da seção da apara não deformada, para torneamento [11]

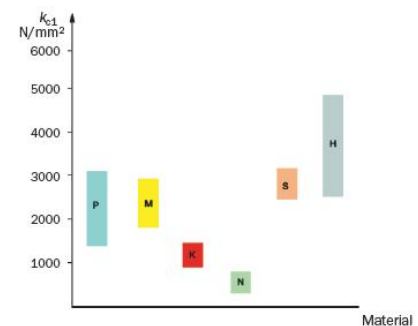


Figura 2.31: Pressão específica de corte para os vários grupos ISO de materiais, para seção de apara de 1 mm^2 [4]

A pressão específica de corte varia essencialmente consoante os parâmetros de corte, o material base a maquinar e a ferramenta de corte. A Tabela 2.7 indica para diferentes materiais as respetivas pressões específicas de corte. Para uma mesma ferramenta, a utilização de velocidades e profundidades de corte elevadas faz convergir a pressão específica de corte para um determinado patamar de estabilidade.

Tabela 2.7: Pressão específica de corte para vários materiais usando uma ferramenta afiada e com uma profundidade de corte, $a_p = 0.25$ mm (adaptado de [9])

Material	Dureza Brinell	Pressão específica de corte N/mm^2
Aço ao carbono	150-200	1600
	200-250	2200
	250-300	2800
Aço ligado	200-250	2200
	250-300	2800
	300-350	3600
	350-400	4400
ferro fundido	125-175	1100
	175-250	1600
Aço inoxidável	150-250	2800
alumínio	50-100	700
Ligas de alumínio	100-150	800
Latão	100-150	2200
Bronze	100-150	2200
Ligas de Magnésio	50-100	400

O interesse prático por este parâmetro reflete-se na possibilidade de estimar, ainda que de forma aproximada, os esforços de corte. De entre as várias fórmulas existentes na literatura, destaca-se a proposta da AWF (*Ausschuss für Wirtschaftliche Fertigung – Associação de produção económica*), que define a pressão específica de corte pela seguinte fórmula de correlação [10, 11]:

$$K_s = \frac{C_w}{f_n^{0.47}} \quad (2.9)$$

Onde C_w é uma constante do material ($C_w = 54$ no caso do latão) e f_n é o avanço em mm/rot

2.3.3.3 Potência de maquinagem

Para o cálculo da potência de acionamento da máquina-ferramenta, é necessário identificar qual a potência necessária para o processo em causa, bem como o rendimento do equipamento. A potência de corte ou potência efetiva de corte (F_{ec}) necessária ao processo de maquinagem, é dada pelo produto da força de maquinagem (F_m) na direção efetiva de corte (P_{ec}), pela velocidade de corte efetiva (V_{ec}) [10, 40]:

$$P_{ec} = \frac{F_{ec} \cdot V_{ec}}{60} = \frac{F_c \cdot V_c + F_a \cdot V_a}{60} \quad [W] = [N] \cdot [m/s] \quad (2.10)$$

Dado que a força e a velocidade na direção de avanço são bastante reduzidas quando comparadas com a força e velocidade na direção de corte, estas componentes podem ser desprezadas e a potência passa a ser dada por:

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60} \quad [W] = [N] \cdot [m/s] \quad (2.11)$$

2.3.3.4 Apara

Como já referido, a maquinagem convencional resulta do processo de remoção de apara do material a maquinar. A apara surge do contacto, e consequente atrito, entre o material da ferramenta e o material da peça. Desse contacto surgem deformações plásticas no material que, em última instância, levam à sua separação/fratura do sólido original. O modo como é feito o contacto pode depender da geometria das ferramentas de corte, mas também dos parâmetros de corte utilizados, sendo a lubrificação um fator bastante importante nesse processo. Consoante as forças e os materiais envolvidos, podem surgir quatro tipos de apara (Figura 2.32) [10, 11]:

- contínua regular: surge em materiais dúcteis e homogêneos, quando são utilizados avanços pequenos e velocidades médias a elevadas ($V_c > 60 \text{ m/min}$);
- contínua irregular: própria de materiais dúcteis maquinados a médias velocidades de corte;
- descontínua: tipo de apara própria de materiais frágeis ou heterogêneos, ou de materiais cuja tensão na base da apara facilite a propagação da fissura ao longo do plano de corte (aços sensíveis a encruamento ou corte a velocidades baixas);
- serrilhada: apara característica de materiais difíceis de maquinar como ligas de titânio, superligas de níquel. Formam-se ciclicamente com a criação alternada de zonas com grandes tensões de corte e de zonas com baixas tensões de corte.

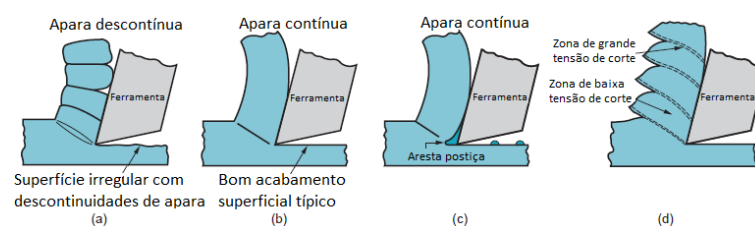


Figura 2.32: Tipos de formação de apara na maquinagem, a) descontínua, b) contínua, c) contínua com apara aderente e d) serrilhada (adaptado de [9])

Para além do tipo de apara, esta pode ser classificada também quanto à sua forma (Figura 2.33). Consoante a forma da apara, podem existir ainda complicações na maquinagem, tais como o acabamento superficial final da peça e o desgaste excessivo da ferramenta.

Em fita	Tubular	Espiral	Helicoid. em gume	Helicoid. cônica	Em arco	Em lascas	Em agulha
Longa	Longa	Plana	Longa	Longa	Ligada		
Curta	Curta	Cônica	Curta	Curta	Fragmento		
Enrolada	Enrolada		Enrolada	Enrolada			

Figura 2.33: Formas de aparas segundo a norma ISO 3685 [10]

De entre as formas acima apresentadas, é de referir que a aparas em fita pode conduzir a acidentes de trabalho e o volume que ocupa é bastante grande. A aparas em lascas é preferível, no caso de pouca disponibilidade de espaço e/ou no caso de operações em que é o lubrificante quem faz a remoção da aparas, como por exemplo, furações profundas. Na generalidade das operações a forma preferível da aparas é a helicoidal [11].

O fenómeno de remoção da aparas deve ser tido em conta também na avaliação do desgaste da ferramenta, visto que a aparas é responsável pela remoção de uma parte do calor gerado durante o processo. A percentagem do calor que escapa pela aparas depende pois do material a maquinar e do material da ferramenta. Enquanto que, por exemplo, um alumínio pode dissipar grande parte do calor pela peça, no caso de um aço a dissipação pode ocorrer pela aparas. São dissipadas maiores quantidades de calor com menores velocidades de corte. A Figura 2.34 ilustra uma distribuição de temperaturas durante um processo de maquinagem [10].

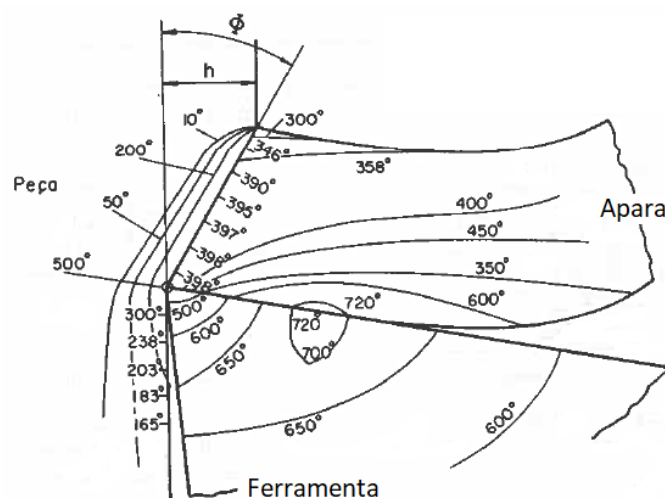


Figura 2.34: Distribuição das temperaturas na aparas, ferramenta e peça, na maquinagem de aço com uma ferramenta em metal duro P20, $V_c = 60 \text{ m/min}$, $f_n = 0.32 \text{ mm}$ [11]

2.3.3.5 Rugosidades

O acabamento superficial é sempre um objetivo em qualquer processo de maquinagem, na medida em que é obrigatório garantir especificações técnicas para que o desempenho da peça maquinada em operação não seja comprometido. A textura de uma superfície maquinada tem sempre algumas imperfeições características do processo, originadas pela remoção da apara. Toda e qualquer superfície maquinada é imperfeita devido a defeitos macro geométricos (geometrias e tolerâncias), micro geométricos (ranhuras e estrias) ou da combinação de ambos. Para avaliar o nível de imperfeição gravado numa superfície, utiliza-se a microscopia, bem como a rugosimetria, como meios auxiliar. A rugosimetria é, pois, uma técnica de análise de superfícies que implica uma coleta de amostras de medição num dado comprimento de medição (L_t) na superfície da peça. Com as sucessivas amostragens, é possível criar um perfil aproximado da superfície real, designada por superfície efetiva. Para além destas duas superfícies, é possível definir uma terceira, a superfície geométrica que representa a superfície pretendida na fabricação da peça. Existem diversos critérios para quantificar as amplitudes das rugosidades entre os quais se destaca a rugosidade média aritmética (R_a), a rugosidade máxima (R_{max}) e a rugosidade máxima média (R_z). A rugosidade máxima média é definida como o valor médio das alturas máximas, medidas em cinco comprimentos de base consecutivos (comprimento de base - L_c). R_z é usualmente mais sensível a alterações no acabamento superficial do que R_a , sendo por isso bastante usado em produção. A rugosidade numa superfície maquinada é afetada quer por parâmetros de corte (por exemplo, o avanço - f_n), quer pela ferramenta em si (raio de ponta da ferramenta - r_e) (ver Figura 2.35), pelo que R_a e R_{max} surgem normalmente correlacionados com estes parâmetros do seguinte modo [41]:

$$R_a = \frac{f_n^2}{32 \cdot r_e} \cdot 1000 \quad (2.12)$$

$$R_{max} = \frac{f_n^2}{8 \cdot r_e} \cdot 1000 \quad (2.13)$$

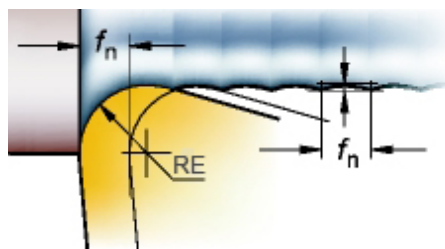


Figura 2.35: Rugosidade da superfície função do raio de ponta da ferramenta, r_e , e do avanço, f_n [4]

2.3.4 Fluidos de Corte

Os fluidos de corte são uma variável fundamental do processo de maquinagem. Como visto anteriormente, quer a dureza do substrato da ferramenta de corte, quer a dureza de um revestimento

decaem com a temperatura. Assim, a finalidade dos fluidos de corte é a de refrigerar e lubrificar todos os elementos envolvidos. Com a refrigeração pretende-se baixar a temperatura de todos os elementos envolvidos diretamente no processo de maquinagem, através de trocas de calor com os fluidos, e também reduzir as deformações que as peças possam adquirir no decorrer do processo. A lubrificação tem também o papel de reduzir a fricção, reduzindo as forças de corte e aumentando a vida da ferramenta, mas também de melhorar o acabamento superficial, visto que a formação da apar é mais regular. Consoante a aplicação final, existem diversos tipos de fluidos de corte, são eles [10]:

- Fluidos de corte gasosos: penetram com mais facilidade que os fluidos líquidos, mas não têm tanto poder refrigerante (à exceção da aplicação criogénica). Usualmente, os fluidos gasosos são ar ou CO_2 , sendo que a sua aplicação criogénica implica custos elevados;
- Óleos puros: óleos minerais com grande diversidade e baixo custo;
- Emulsões: mistura de óleo, água e um emulsionador, que é responsável pela dispersão do óleo na fase aquosa. São empregues em maquinagem com elevadas velocidades de corte;
- Óleos sintéticos: mistura de agentes químicos com água, capazes de grande refrigeração. Os elementos químicos dependem da finalidade, seja ela ação anti-bacteriana (germicidas) ou anti-corrosiva (nitritos) ou outra.

Consoante a aplicação, pode ser ainda exigido ao lubrificante ter algum grau de transparência e/ou ser compatível com os óleos lubrificantes da máquina em questão [42]. De notar que os fluidos de corte podem ser projetados para a superfície maquinada de uma ou de duas formas distintas (ver Figuras 2.36 e 2.37); projeção externa ou interna, através de canais de refrigeração existentes no interior da ferramenta, que podem conduzir o fluido pelo interior das ferramentas até às zonas de interesse.



Figura 2.36: Refrigeração externa [43]

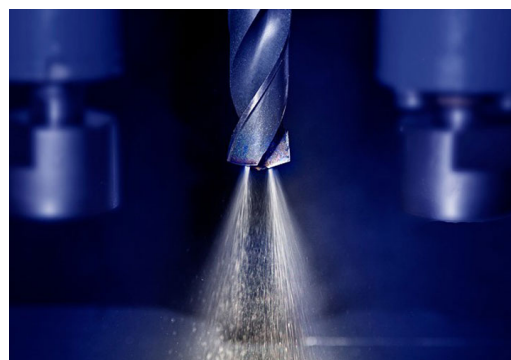


Figura 2.37: Refrigeração interna [44]

Para além da zona por onde é projetado o lubrificante, existem também soluções tecnológicas distintas para a sua projeção. A utilização de fluido de corte pressurizado (> 10 bar) aliado a uma correta projeção sobre o binómio ferramenta-peça, pode ser uma alternativa aos métodos

convencionais, permitindo uma lubrificação mais eficiente. A lubrificação deve ser ainda capaz de vencer o efeito da contra corrente gerada pelo arranque da apara [45].

Partindo dos princípios atuais que visam a redução de custos e poupanças ambientais, tem surgido uma nova técnica, alternativa às técnicas anteriormente mencionadas. O princípio por detrás desta técnica é a aplicação de um filme altamente pressurizado na zona de corte, constituído por gotículas de óleo, que são dispersas num fluxo de ar [4, 40]. Esta técnica é designada por quantidade mínima de lubrificação (*Minimal Quantity Lubrication* - *MQL*) e a sua diferença para os sistemas convencionais é perceptível na Figura 2.38 e 2.39.



Figura 2.38: Maquinagem com sistema de refrigeração abundante convencional [46]



Figura 2.39: Maquinagem com sistema de refrigeração MQL [46]

2.4 Ligas Cu-Zn, Latão

Tendo em conta que neste trabalho serão abordadas as ligas de latão, nesta secção apresenta-se uma revisão geral sobre este material e na secção seguinte uma revisão sobre a sua maquinabilidade. As ligas de latão são consideradas ligas de cobre, um grupo importante das ligas não ferrosas. Em termos de produção, estas ligas são apenas superadas pelas ligas de aço e de alumínio. Existem atualmente diversas ligas Cu-Zn, nomeadamente latão, dadas as inúmeras necessidades e aplicações, tais como produtos sanitários, parafusos, válvulas de água, componentes elétricos, componentes para a indústria automóvel, entre muitos outros. A sua larga utilização deve-se às suas boas propriedades de resistência à corrosão, boa resistência ao desgaste, boa condutividade elétrica e térmica e excelentes propriedades anti-bacterianas, necessárias às suas aplicações (Figuras 2.40 e 2.41, zonas assinaladas a vermelho) [3, 47, 48].

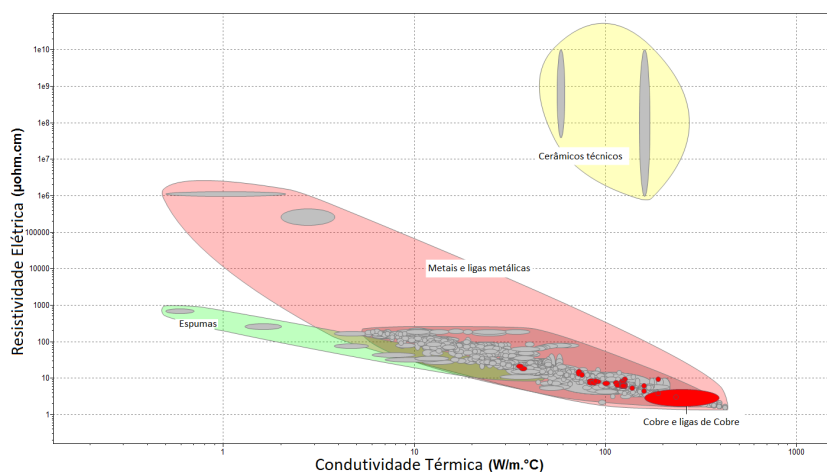


Figura 2.40: Resistividade Elétrica ($\mu\text{Ohm.cm}$) vs Condutividade Térmica ($\text{W/m.}^{\circ}\text{C}$) [14]

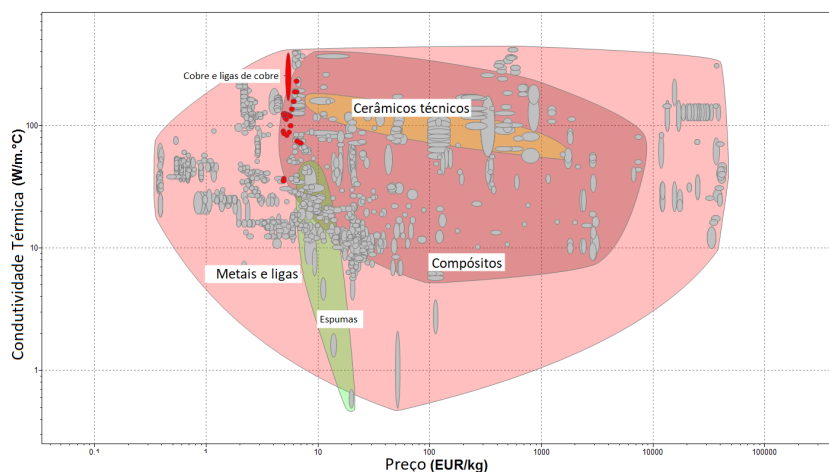


Figura 2.41: Condutividade Térmica ($\text{W/m.}^{\circ}\text{C}$) vs Preço (EUR/kg) [14]

Estas ligas são essencialmente compostas por dois elementos principais, o cobre (Cu) e o zinco (Zn) e por outros elementos minoritários tais como chumbo (Pb), silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe), Manganês (Mn), estanho (Sn), níquel (Ni) ou o arsénio (As). O cobre, elemento principal, representa usualmente uma percentagem não inferior a 55% da composição química da liga, enquanto que o zinco apresenta habitualmente uma percentagem entre 5 e 45% [49]. A composição percentual de outros elementos varia bastante consoante a aplicação final pretendida. Cada elemento confere diferentes efeitos na liga de latão final:

alumínio: responsável pela criação de uma fina película à superfície capaz de proteger a peça contra a corrosão, conferindo também o aspeto da superfície das peças fundidas [50];

alumínio: até 0.1% tem um contributo grande na prevenção da dezincificação, juntamente com um aumento do elemento cobre até 60% [51];

chumbo: é um metal que facilita o processo de fundição, pois evita a formação de rechupes. O Pb é um elemento muito pouco solúvel no latão, pelo que se dispõe sob a forma de glóbulos na microestrutura, particularmente nas fronteiras de grão, prevenindo então o aparecimento de

microrechupes. Este elemento é também importante para a maquinagem, pois parte dos glóbulos fundem e formam uma fina película semi-líquida, que atua como lubrificante natural do processo (sabendo que a temperatura de fusão do chumbo é de: $T_m = 327.5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Esta fina película permite não só reduzir as forças de corte, mas também melhorar a quebra da apara, melhorando a rugosidade e diminuindo o desgaste da ferramenta [50]. A sua utilização está porém condicionada, pois o Pb é um metal pesado que, em elevadas quantidades, pode até ser considerado tóxico para a saúde humana. Segundo a diretiva americana, *Reduction of Lead in Drinking Water Act - United States Environmental Protection Agency*, o teor percentual de chumbo deverá estar restrito a 0.25% do peso em todos os componentes de canalizações (tubagens, torneiras, canalizações, entre outros) [50];

estanho: um fenómeno que ocorre com frequência é a dezincificação, que provoca a dissolução seletiva do zinco, traduzindo-se em fissuras. Para combater este efeito, o estanho é importante na medida em que a sua adição aumenta a resistência à dezincificação. O seu conteúdo não deve, contudo, ultrapassar muito os 0,3% pois pode provocar fragilidade a quente e, consequentemente, fissuração das peças no arrefecimento. De acordo com *Vilarinho et al.* (2005), a adição de estanho provoca ainda uma diminuição acentuada das forças de corte [50];

ferro: atua como refinador de grão, o que se traduz numa melhoria da resistência mecânica a quente e consequente redução do aparecimento de fissuras, no arrefecimento de peças de geometria complexa. Negativamente, este elemento é também reativo, nomeadamente com o silício. Quando estes dois elementos reagem entre si, podem formar “pontos duros”, derivados de um composto muito duro, o siliceto de ferro, que são prejudiciais para as operações de maquinagem [50];

níquel: faz parte da composição pela melhoria que traz à liga na resistência à corrosão da mesma. Dado o seu custo elevado, não é utilizado em maiores percentagens [50];

zinco - Uma quantidade deste elemento inferior a 35% da composição gera um latão monofásico (fase α), caracterizado por ser pouco dúctil e duro, aconselhado para o trabalho mecânico a frio. Entre 37 e 45% de zinco resultam latões bifásicos (fases α e β), mecanicamente mais resistentes e duros, porém desaconselhados para processos de laminagem, estampagem ou extrusão a frio. Existe ainda um terceiro tipo de latões monofásicos (fase β), cuja percentagem de zinco é superior a 45%, mas raramente são utilizados devido à sua elevada dureza e fragilidade. Este último tipo de latões tem poucas aplicações, tendo em conta as suas propriedades. A Figura 2.42 ilustra o diagrama de fases do sistema Cu-Zn [50].

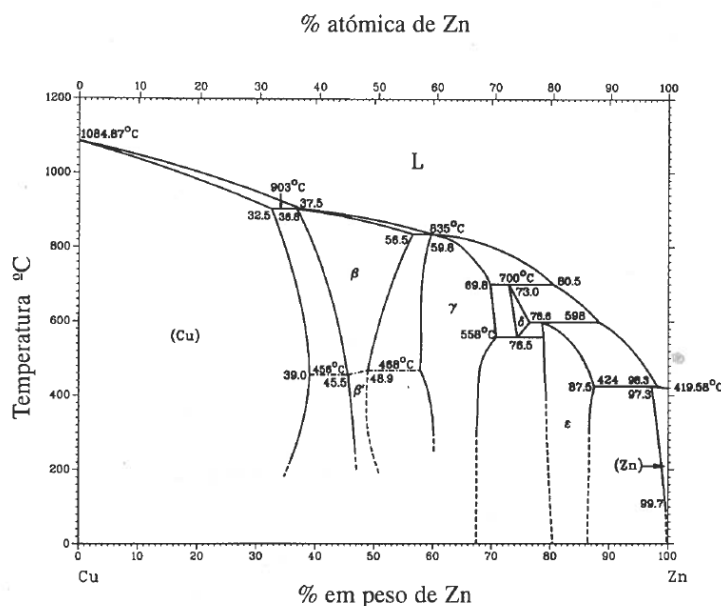


Figura 2.42: Diagrama de fases do sistema Cu-Zn [50]

2.5 Maquinabilidade de Ligas Cu-Zn, Latão

A maquinabilidade do cobre e das ligas de cobre pode ser dividida em três categorias, altamente maquináveis, moderadamente maquináveis e ligas difíceis de maquinar. A maquinabilidade do cobre é afetada negativamente por elementos como o estanho e o ferro, enquanto elementos como o chumbo, o telúrio, o zinco e o enxofre melhoram a maquinabilidade [52].

A maquinabilidade pode ser baseada em quatro critérios distintos, nomeadamente nas forças de corte, no tipo de apara resultante, na rugosidade superficial do material e no desgaste da ferramenta. O índice de maquinabilidade é usualmente utilizado em termos comparativos, e não numa escala absoluta. Esta comparação deriva do facto de que quando se testam novos materiais, procuram utilizar-se materiais já conhecidos como base de referência. Tendo por base um material já conhecido, é possível fazer uma análise comparativa entre os vários. Definem-se, de acordo com os quatro critérios, quatro índices que compõem o índice de maquinabilidade, são eles:

- Índice de força relativa (*RFRI - relative force rating index*) - é baseado nas forças de corte, sendo obtido pela divisão entre as forças de corte do material a estudar e do material de referência;
- Índice de desgaste da ferramenta (*RTRI - relative tool wear rating index*) - o desgaste da ferramenta é avaliado no novo material, comparativamente ao de referência, e é calculado analogamente ao anterior;
- Índice de rugosidade superficial (*RRRI - relative roughness rating index*) - este índice reflete a rugosidade obtida na maquinação do novo material, quando comparada com a rugosidade do material de referência. O processo de cálculo é semelhante aos dois índices anteriores;

- Índice de classificação do tipo de apara (*RCRI - relative chip type rating index*) - é baseado no tipo de apara, e é calculado pela divisão entre as classificações da apara do material a estudar e do material de referência.

A análise destes índices é, pois, subjetiva, na medida em que apenas se obtêm daí análises comparativas. Estes parâmetros são avaliados sempre em função de um dos ensaios, que é considerado como o valor de referência [52].

A uma grande parte das ligas de latão é adicionada uma pequena quantidade percentual de Pb, entre 1 a 3%, cujo objetivo é aumentar a maquinabilidade da liga. Como referido anteriormente, o chumbo diminui o tamanho de grão e, como é pouco ou nada solúvel no cobre, precipita nas fronteiras de grão. Quando é maquinado, o chumbo forma uma fina película semi-líquida que atua como lubrificante da ferramenta permitindo reduzir as forças de corte (10 a 30%, sendo a diferença mais notória para parâmetros mais agressivos, ou seja, valores mais elevados de V_c e f_n), reduzir o coeficiente de atrito e uma quebra mais eficaz da apara (ver Figura 2.43) [53, 54]. De acordo com [54], para as condições de ensaio em torneamento cilíndrico de $V_c = 400 \text{ m min}^{-1}$, $a_p = 0.5 \text{ mm}$ e $f_n = 0.3 \text{ mm rot}^{-1}$, para duas ligas de latão com diferentes composições de Pb, de 3% e 0.09%, as forças de corte foram de 580 e 800 N, respetivamente. Através desta comparação, é possível ter uma ordem de grandeza para comparação e verificar a influência do elemento Pb na maquinabilidade das ligas de latão. As potências de corte são também relevantes num processo industrial, onde pequenos ganhos se traduzem em grandes melhorias. Neste contexto, [55] concluiu que a potência de corte depende essencialmente de a_p e de f_n , fatores esses que, quando otimizados se podem traduzir numa poupança de energia no processo. A quebra da apara não é uma questão tão importante em ligas de latão com maior quantidade de Pb, pois a apara é descontínua e quebra com relativa facilidade. Ao invés, com a diminuição da contribuição do Pb, a questão da apara surge com o aparecimento de dificuldades na quebra da mesma. A dificuldade na quebra da apara pode dificultar bastante o processo produtivo, sendo que poderá ser aconselhada a utilização de uma geometria na ferramenta com quebra-apara, ainda que tal resulte num incremento de custos da ferramenta [54].

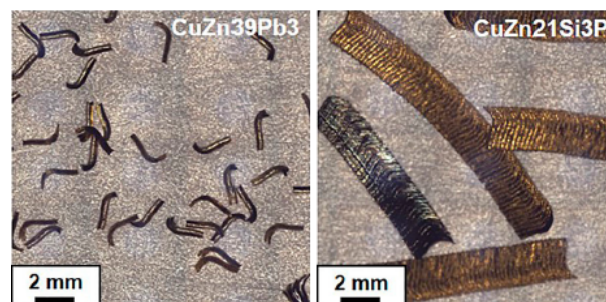


Figura 2.43: Apara de maquinagem das ligas $\text{CuZn}_{39}\text{Pb}_3$ (esquerda) e $\text{CuZn}_{21}\text{Si}_3\text{P}$ (direita), $V_c = 400 \text{ m/min}$, $f_n = 0.2 \text{ mm/rot}$, $a_p = 2 \text{ mm}$ [54]

Segundo [49], o tamanho de grão é cerca de dez vezes menor quando o chumbo é adicionado, quando comparando ligas com cerca de 3% e 0.05% deste mesmo elemento. Ao atuar como

lubrificante da ferramenta, o Pb possibilita um menor desgaste da ferramenta e maiores taxas de produção. [54], estudou o efeito do Pb no desgaste das ferramentas e conclui (ver Figura 2.44) que a contribuição deste elemento é muito significativa. Após 142 minutos de maquinagem de latão com reduzido teor de Pb (0.09%), verifica-se que a ferramenta (sem quebra-apara) apresenta um desgaste considerável (craterização) e que fraturou, não podendo ser mais utilizada. Segundo técnicas de microscopia eletrônica, verifica-se que a craterização ocorre pela difusão de elementos de cobalto na apara resultante. A desagregação deste elemento na matriz da ferramenta faz com que a ligação da sua estrutura enfraqueça e daí resulte o desgaste, craterização. Pelo contrário, quando maquinada uma liga de latão com alto teor de Pb (3%), o desgaste após 160 minutos de trabalho é reduzido, evidenciando-se apenas pequenos sinais de craterização.

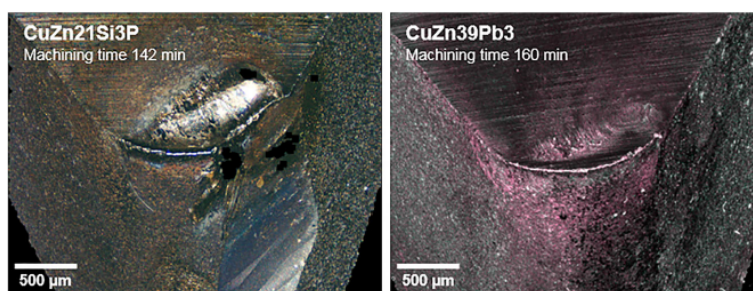


Figura 2.44: Desgaste comparativo de ferramentas em WC na maquinagem de ligas de latão com diferentes composições de Pb, CuZn21Si3P com 0.09% e CuZn39Pb3 com 3% [54]

O efeito do Pb na maquinagem é variável consoante a sua composição química na liga, que irá determinar o tamanho dos grãos, a sua dispersão na matriz e as propriedades do material devidas à sua microestrutura (ver Figura 2.45). As partículas de Pb e a fase β são os constituintes microestruturais que mais influência têm na morfologia e tamanho da apara. Enquanto que as partículas de Pb controlam a quebra da apara, a fase β influencia a formação de micro-fissuras e de zonas de concentração de tensões de corte [55]. A sua contribuição para a composição química da liga geralmente não ultrapassa os 3%, dado que a partir desse valor não se obtêm melhorias que o justifiquem [3,47,49].

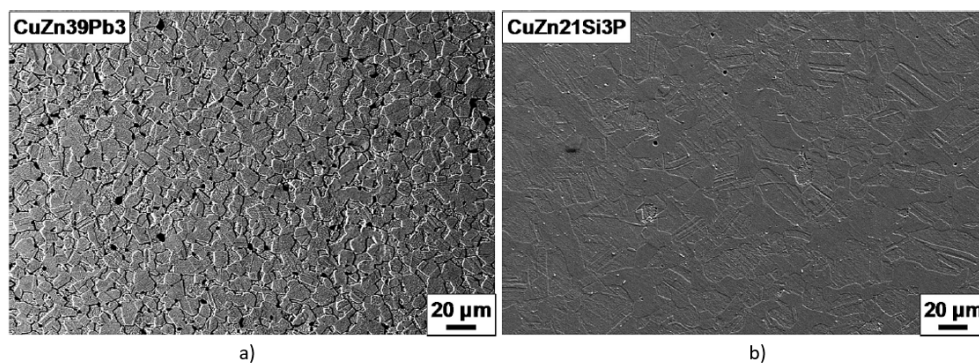


Figura 2.45: Exemplos de microestruturas de ligas de latão com chumbo, 3.3% (a), e valor residual de chumbo, 0.9% (b) [3]

O chumbo tem vindo a ser restringido na produção de diversos artigos sanitários (torneiras, canalizações, etc.), como visto anteriormente (até um máximo de 0.25% do peso). Em contrapartida, têm sido experimentados outros elementos para substituírem chumbo. Para além do fósforo, selénio, silício e do índio, o bismuto tem sido o mais desenvolvido. Embora os resultados não tenham sido ainda bastante satisfatórios, o bismuto tem sido o mais aplicado pois melhora a maquinabilidade do material. Apesar desta vantagem, sacrifica algumas propriedades mecânicas das ligas de latão (fragilização do cobre) e é mais caro em cerca de dez vezes (quando comparado com o Pb). De acordo com [56], a adição de bismuto pode trazer ainda outro inconveniente. Em testes realizados em torneiras, foi possível verificar que quando é adicionado o bismuto, este distribui-se em grandes quantidades nas fronteiras de grão, diminuindo a ductilidade e aumentando a possibilidade de formação de fissuras. Quer a formação, quer a propagação dessas mesmas fissuras são potenciadas pelo bismuto presente nas fronteiras de grão. De notar ainda que os depósitos geológicos de bismuto estão normalmente agregados com chumbo, pelo que a exploração do bismuto iria gerar, por si só, grandes reservas de chumbo, contrariamente ao pretendido [2, 3, 50, 52, 57].

Para além das propriedades que o elemento chumbo adiciona à liga, é também importante perceber qual o papel dos restantes constituintes cuja composição química assim o justifique.

Embora a maquinagem de ligas de latão e os parâmetros de corte correspondentes não tenham sido amplamente explorados na literatura, alguns autores sugerem velocidades de corte entre os 50 e os 430 m/min aproximadamente, avanços entre 0.025 e 0.3 mm/rot e profundidades de corte até 2 mm, sendo os valores intermédios dos 3 parâmetros mencionados os mais utilizados [3, 48, 52, 53, 57].

2.6 Maquinagem na GROHE

A GROHE é uma empresa multinacional cuja atividade é a produção de componentes sanitários (ver Figura 1.1 e 1.2). A produção deste tipo de produtos envolve diversas etapas produtivas, que começa com a fundição das matérias-primas (ligas de latão) e através da qual se obtêm produtos vazados (por gravidade e baixa pressão) já com algumas cavidades internas definidas. Após este processo, segue-se a maquinagem, local da realização deste trabalho, que será descrito com mais detalhe nos parágrafos seguintes. Posteriormente, seguem-se os acabamentos dados pela lixagem e pelo polimento, onde o produto adquire a sua geometria final. Para uma maior durabilidade e aspeto cromado dos produtos, estes são sujeitos a banhos químicos e revestidos com camadas protetoras de níquel e cromo, no departamento da galvanização. Findo o processo de revestimento, os produtos chegam à montagem, local onde são montados pequenos componentes no corpo principal e finalmente embalados.

O departamento de maquinagem é, como todos os outros, um departamento com grande relevo no processo produtivo, onde existem doze centros de maquinagem com Comando Numérico Computorizado (CNC), capazes de taxas de produção elevadas (milhares de peças/dia). Nestes equipamentos, as operações de maquinagem realizadas são a furação e a fresagem, sendo que o

abastecimento das peças é manual, peça a peça, ou então por paletes, no caso dos centros mais avançados.

A produção no setor inicia-se com as peças provenientes da fundição que são maquinadas e em seguida lavadas, para remover a limalha e emulsão resultantes do processo. Após a lavagem, as peças podem ter dois seguimentos distintos. No primeiro caso, as peças são sujeitas a um teste de estanquidade para despistar qualquer fuga de água proveniente de algum rechupe de fundição e/ou micro-fissura(s) que possa(m) existir. Este teste é realizado para algumas referências de produtos, e é unitário, ou seja, feito a todas as peças sem exceção. Na segunda situação, caso passem no teste de estanquidade ou não necessitem deste, passam diretamente para o seu destino seguinte, a secção dos acabamentos (lixagem, polimentos).

Embora nem sempre seja visível a olho nu o efeito do desgaste das ferramentas, por vezes as geometrias pretendidas não estão a ser cumpridas, com diferenças na ordem dos décimos de milímetro. Periodicamente, existe então um controlo dimensional feito às peças produzidas, no sentido de averiguar qualquer desgaste das ferramentas e/ou anomalia no funcionamento da máquina.

2.6.1 Ferramentas de Corte

Cada produto produzido e maquinado na GROHE é único, pelo que o perfil geométrico a maquinar também o será. A existência de perfis singulares impede a utilização de ferramentas *standard* e obriga à utilização de ferramentas especiais customizadas (ver exemplo na Figura 2.46). As principais operações de maquinagem são a furação e a fresagem, havendo contudo, operações de torneamento para acessórios e/ou componentes de torneiras.

Apesar de o diamante (PCD) ser altamente aconselhável para a maquinagem deste tipo de materiais, dada a sua produtividade vs investimento, este não pode ser aplicado nas operações (ou pelo menos na sua grande maioria). O facto de o processo anterior à maquinagem ser a fundição, implicando a utilização de machos de areia para fazer os contornos necessários, conduz à existência de areias incrustadas nas paredes da peça. Mesmo com o processo de granalhagem existente (remoção de areias utilizando granalha), este não é 100% eficiente. Ou seja, o diamante em contacto com cerâmicos seria riscado e danificado rapidamente, até que acabaria por conduzir à destruição precoce das pastilhas. A implicação desta realidade é que todas as ferramentas que tenham um contacto direto com uma superfície de fundição não podem ser diamantadas. Enquanto que a maioria das ferramentas utilizadas são em metal duro (*HM*), pelas razões anteriormente mencionadas, apenas as ferramentas de acabamento podem ser diamantadas.

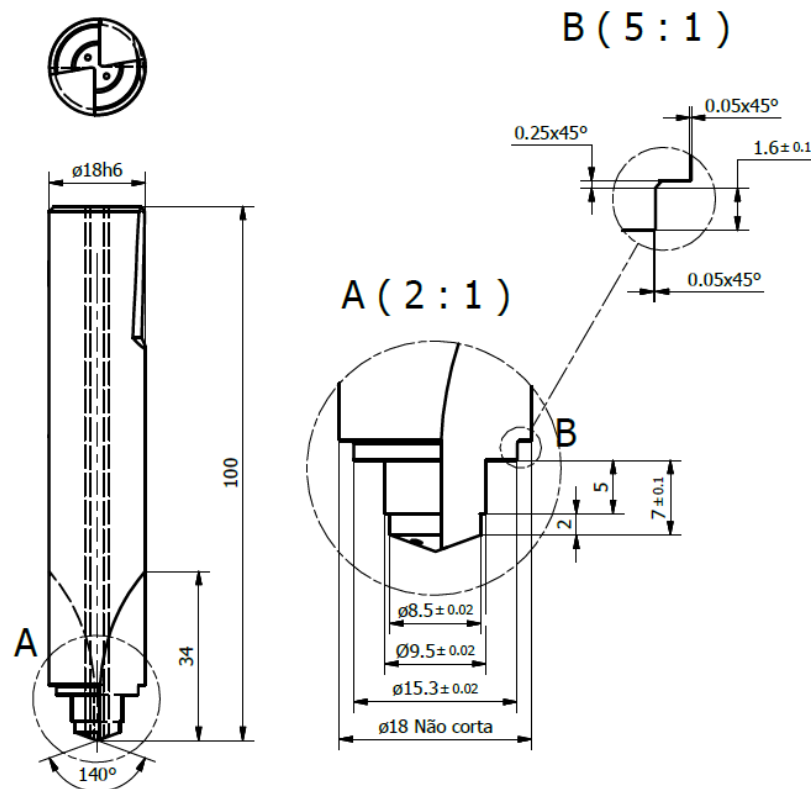


Figura 2.46: Exemplo de ferramenta de furação - referência 829A5125

A geometria das ferramentas é fabricada consoante o perfil final requerido e, como tal, quer o tipo de ferramenta quer os ângulos da parte ativa da ferramenta variam (mantendo-se constante em todas as arestas de corte). Na produção, existem ferramentas com insertos e pastilhas de corte (rocas), ferros de forma (e outras aplicadas em torneamento), brocas, fresas e machos. A grande maioria das ferramentas utilizadas são brocas com insertos brazados, onde a sua utilização é justificada com a complexidade exigida pelos perfis e com a sua durabilidade. De acordo com os fabricantes, apenas o ângulo de ataque do inserto é controlado e é igual a 6° . Todos os restantes ângulos são dimensionados consoante o processo, de modo a permitir uma correta operação.

2.6.2 Operações, Parâmetros e Fluidos de Corte

Para o fabrico de todos os artigos sanitários feitos na GROHE Portugal, as operações de maquinagem utilizadas são, por ordem de utilização, a furação (80 a 90%), seguida da fresagem e, numa quantidade muito reduzida, o torneamento de componentes.

A parametrização de todas as variáveis de corte é feita consoante o perfil geométrico, o material da ferramenta, a liga utilizada, as fórmulas matemáticas anteriormente apresentadas (parâmetros de corte) e a própria experiência em maquinagem com estas características. Os parâmetros de corte introduzidos na programação dos centros CNC são a velocidade de corte, V_c , definida através da frequência de rotação n , e a velocidade de avanço da mesa ou ferramenta (V_f). No que diz respeito ao perfil geométrico, este é contabilizado para o cálculo da velocidade de rotação (n), onde

é também considerado o material utilizado. A velocidade de corte, V_c , depende da operação, varia entre os 150 e os 400 m/min. O avanço da ferramenta (f_n) é de 0.10 a 0.15 mm/rot em operações de desbaste e para operações de acabamento ronda os 0.05 mm/rot. A profundidade de corte é variável, pois as tolerâncias de fundição são muito grandes, fazendo a_p variar bastante ($0.5 < a_p < 2$ mm). No seu geral, os parâmetros de corte estão de acordo com a pesquisa bibliográfica feita. Tendo todos estes parâmetros definidos, podem ainda ser feitos alguns ajustes, consoante haja ou não interesse produtivo em maquinar um maior número de peças (parâmetros mais agressivos), ou então no sentido de poupança económica das ferramentas (parâmetros de corte suavizados).

Dado que a cadência produtiva é bastante elevada, a utilização de fluidos de corte é indispensável por todos os motivos anteriormente referidos. Os fluidos de corte utilizados são líquidos, mais especificamente óleos emulsionáveis (emulsões). A emulsão é distribuída a 10 bar aproximadamente, e é constituída por cerca de 95% de água e 5% de óleo de corte.

Capítulo 3

Maquinabilidade de Ligas Cu-Zn, Latão

A grande maioria dos produtos maquinados na GROHE têm por base as ligas Cu-Zn (latão) e, para um melhor entendimento do processo de maquinagem, é necessário conhecer os materiais utilizados. Para tal, neste capítulo, procurou-se através de ensaios de maquinagem, entre outros, avaliar a maquinabilidade de um conjunto de ligas de latão utilizadas na empresa, onde se destacam diferentes teores de chumbo.

3.1 Obtenção do Latão na GROHE

As peças para artigos sanitários produzidas na Grohe (e.g. torneiras) provêm da fundição, local onde se inicia todo o processo produtivo e ao qual se seguem operações de maquinagem, acabamento e revestimentos. Antes mesmo de a liga ser fundida e vazada, é necessária a produção de machos de areia (na macharia) capazes de reproduzir as cavidades ocas existentes nas torneiras.

As ligas Cu-Zn utilizadas são obtidas recorrendo a dois fornos principais de indução, de onde parte material para abastecer as linhas de produção, nomeadamente fornos de menores dimensões destinados apenas a manter a temperatura do metal (fornos de manutenção) até este ser vazado. Na fusão central, onde se encontram os dois fornos principais, a composição das ligas e a temperatura são rigorosamente controladas e ajustadas periodicamente, tendo em conta as diretivas internas da empresa. O ajuste da composição química das ligas é feito sempre com a adição de matérias-primas, consoante as necessidades. Parte das matérias-primas são adicionadas sob a forma de lingotes e outra parte sob forma de limalha, proveniente da maquinagem e/ou desperdícios de vazamento. A temperatura dos fornos principais é constante e ronda os 1050 ± 50 °C, enquanto que nos fornos de manutenção ronda os 1000 °C.

O vazamento do latão na GROHE é feito essencialmente por baixa pressão, sendo também utilizado o vazamento por gravidade nalguns casos. Aquando do vazamento, é aplicado um desmoldante à base de materiais cerâmicos, e são introduzidos os machos de areia. Após o vazamento, as peças são retiradas do molde (Figura 3.1) e arrefecidas ao ar. Quando estão já com a temperatura

mais próxima do seu manuseamento, são cortadas com uma serra de fita (Figura 3.2) e seguem para o próximo processo, a granalhagem. Nesta etapa, todas as areias restantes dos machos no interior das peças são retiradas; a granalha confere também um melhor acabamento, pois elimina algumas rebarbas superficiais existentes após a fundição.

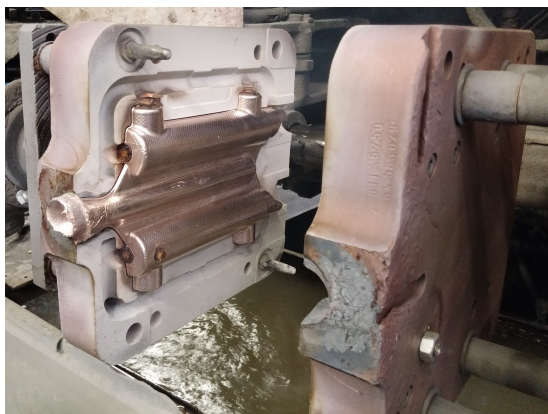


Figura 3.1: Molde utilizado para o vazamento de chuveiros em latão



Figura 3.2: Serra de fita de corte do material vazado

Na empresa são utilizadas três ligas de latão diferentes, para diferentes produtos e diferentes mercados. A grande maioria dos produtos fabricados utiliza a liga GROHE Light, cerca de 60 a 70% da quota, tendo a liga GROHE DZR cerca de 20% e, o restante é atribuído à liga GROHE 0. Embora esta última seja a menos utilizada, algumas instituições mundiais, nomeadamente entidades reguladoras nos Estados Unidos da América, pretendem reduzir drasticamente o Pb da composição das ligas utilizadas em produtos sanitários. Este facto deve-se ao elemento chumbo apresentar malefícios para a saúde humana [2]. A diferença na composição química entre as três ligas, advém do facto de estas ligas serem utilizadas com diferentes requisitos, em mercados mundiais distintos. Para além da liga GROHE Light, usada como referência, existe a liga GROHE DZR, própria para águas mais corrosivas, onde o fenómeno de dezincificação é mais notório e ainda a liga GROHE 0, com menor percentagem de chumbo devido a regulamentações específicas nalguns países.

A Tabela 3.1 é referente a algumas propriedades mecânicas, já conhecidas das ligas, fornecidas pela empresa.

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas das ligas GROHE fornecidas pela empresa e revistas, segundo a norma DIN EN 1982

Liga	Dureza	Tensão limite elástico, $R_{p0.2}$	Tensão de rotura, R_m	Extensão após rotura
	HB	MPa	MPa	%
GROHE 0	105	170	450	25
GROHE Light	70	120	280	10
GROHE DZR	70	120	280	10

3.2 Procedimento Experimental

Foram realizados ensaios de maquinagem recorrendo a provetes cilíndricos e a torneamento cilíndrico exterior. Os ensaios de maquinagem consistem na maquinagem de seis provetes, dois provetes de cada uma das diferentes ligas utilizadas na GROHE. De modo a poder caracterizar melhor as ligas de latão, algumas propriedades têm de ser obtidas e quantificadas. Algumas propriedades mecânicas são já conhecidas e foram fornecidas pela própria empresa (Tabela 3.1), enquanto que outras propriedades serão obtidas neste estudo. A estrutura dos ensaios de caracterização dos materiais é então definida da seguinte forma:

- Obtenção de provetes de ensaio (vazamento);
- Ensaios de maquinagem:
 - torneamento cilíndrico com medição de esforços;
 - medição de rugosidades;
- Análise de aparas de maquinagem;
- Análise química e microestruturas;
- Análise de durezas.

3.2.1 Provetes de Ensaio

A obtenção dos provetes (Figura 3.3) foi efetuada com recurso a uma coquilha de cobre, de ϕ 58 mm x 180 mm, com uma aplicação prévia de desmoldante à base de cerâmicos. Esta aplicação de desmoldante foi efetuada sempre na preparação da coquilha, para cada um dos provetes. Os provetes foram obtidos com recurso a vazamento manual (por colher), com o banho de metal líquido a rondar a temperatura de 1000 °C. Tendo em conta o tipo de vazamento, a ocorrência de porosidades é expectável, bem como a existência de rechupes devidos à contração do material.

No total foram vazados seis, dois de cada uma das três ligas, ou seja, dois provetes da liga GROHE 0, dois provetes da liga GROHE Light e dois provetes da liga GROHE DZR, doravante designados por Z1, Z2, L1, L2, R1 e R2, respetivamente.

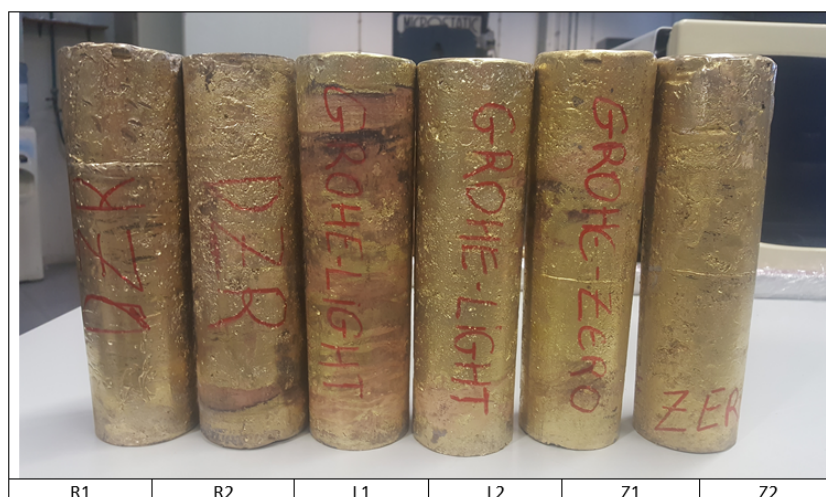


Figura 3.3: Provets vazados para ensaios de maquinabilidade: R1 e R2 - material GROHE DZR, L1 e L2 - material GROHE Light, Z1 e Z2 - material GROHE 0

3.2.2 Ensaios de Maquinagem

Os ensaios de maquinagem foram efetuados nas oficinas do DEMec, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, com recurso a vários elementos e dispositivos, de seguida descritos.

3.2.2.1 Provets

De acordo com a norma ISO 3685-1993 (Figura A.1 - ver Anexo A), os provets de ensaio necessitam de algumas especificidades, tais como o furo de centragem e a necessidade de um rácio comprimento/diâmetro inferior a 10 [40, 58].

Quer o diâmetro, quer o comprimento estão um pouco limitados tendo em conta as dimensões da coquilha de vazamento. Na preparação dos provets de ensaios, estes foram pré-maquinados para o diâmetro de 55 mm para eliminar interferências da superfície rugosa e porosa obtida na fundição. A fixação dos provets ao torno foi feita recorrendo a uma bucha de quatro grampos auto-centrante e contraponto.

3.2.2.2 Torno mecânico paralelo

A medição dos esforços de corte requer, preferencialmente, máquinas robustas capazes de executar um trabalho simples, rápido e repetitivo. Para tal, foi utilizado um torno paralelo convencional, disponível nas oficinas do DEMec (Figura 3.4). Este torno tem uma potência de 5.9 kW e uma frequência de rotação máxima de 2500 rpm. As frequências de rotação são escalonadas e os avanços (f_n) são predefinidos de acordo com a cadeia cinemática do torno.



Figura 3.4: Torno paralelo *EFI DU20* utilizado nos ensaios de torneamento

3.2.2.3 Ferramenta de corte e porta ferramentas

Os ensaios de maquinagem incidiram no torneamento cilíndrico, tendo sido usada uma ferramenta com pastilha de corte em PCD e com face de ataque lisa (sem quebra aparas), cuja descrição se realiza nesta secção. Optou-se por uma ferramenta com a geometria mais simples possível de modo a permitir a avaliação da pressão específica de corte com a menor influência da ferramenta de corte. Assim, para os ensaios de maquinagem que visam avaliar a maquinabilidade de três ligas de latão distintas, foi utilizada uma pastilha de metal duro com uma plaqueta lisa de PCD fornecida pela MAPAL (Material PU620) (Figuras 3.6 e 3.5, pastilha e dimensões da mesma, respetivamente). A utilização do PCD é justificada com uma excelente *performance* deste material na maquinagem de materiais não ferrosos, e obtenção de bons acabamentos superficiais. Também o uso deste tipo de pastilha possibilitou a realização de todo o trabalho com a mesma pastilha, sem que se tivesse observado desgaste sensível da mesma. A geometria da pastilha de corte foi selecionada tendo em conta os requisitos da operação e a simplicidade desejada nos resultados (sem quebra-apara), ou seja, o menor número de variáveis possível. Para auxiliar na simplificação de resultados, foram também adotados um ângulo de posição da aresta de corte, χ , de 90° , um ângulo de ataque, γ , de 0° e um ângulo de inclinação da aresta de corte, λ , de 0° [12, 40]. O ângulo de saída, α , da ferramenta foi de 7° , o ângulo de ponta, ε , de 55° e o raio de ponta, R_ε de 0.8 mm.



Figura 3.5: Porta-ferramentas com pastilha de corte em metal duro com inserto PCD do fabricante MAPAL (ref^a: DCGW11T304F01N-0AA [59])

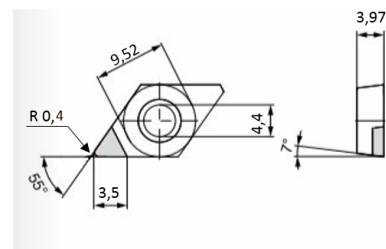


Figura 3.6: Dimensões em mm da pastilha de corte [60]

O porta-ferramentas foi também escolhido e preparado tendo em conta o tipo de ensaio, esforços de maquinagem, dimensões do suporte e sentido de maquinagem - suporte esquerdo (ver Figura 3.5).

3.2.2.4 Sistema de medição de esforços de maquinagem

Os ensaios de maquinagem foram instrumentados com células de carga de modo a permitir a medição dos esforços de maquinagem, com os quais se podem avaliar diversos parâmetros de maquinabilidade das ligas de latão.

Para a medição dos esforços de corte (F_a , F_p e F_c), durante o torneamento, foi utilizada uma célula de carga composta por um dinamómetro piezoelétrico *KISTLER 9257B* e um sistema de fixação baseado no sistema *KISTLER 9403* (Figuras 3.7 e 3.8). A frequência de aquisição de dados foi ajustada para 100 Hz, permitindo aquisições a cada 0.01 segundos, ou seja, 100 pontos de aquisição a cada segundo de trabalho.

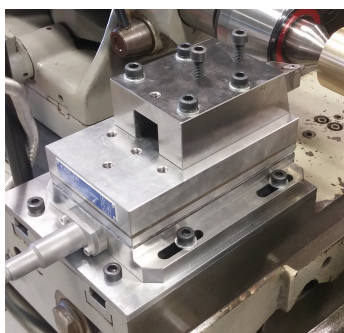


Figura 3.7: Célula de carga utilizada nos ensaios de torneamento montada no torno

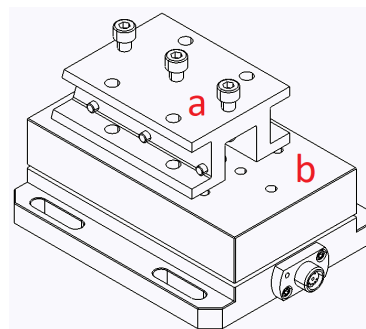


Figura 3.8: Esquema da célula de carga e suporte da ferramenta: a - sistema de fixação *KISTLER 9403*; b - dinamómetro piezoelétrico *KISTLER 9257B* (adaptado de [61])

Os sinais da célula de carga são na forma de cargas elétricas (pC), pelo que são posteriormente amplificados e convertidos proporcionalmente, em sinais de tensão (V) através do amplificador de carga *KISTLER 5070* (Figura 3.9). Dado que os sinais resultantes do dinamómetro são referentes a três variáveis distintas adquiridas em simultâneo (F_a , F_p e F_c), também o amplificador de carga usa três canais distintos de amplificação. Após a conversão e amplificação do sinal, é necessário então um sistema para a aquisição dos dados. O sistema usado foi o sistema da *HBM Spider8* (Figura 3.9) com o software *Catman*. Em conjunto, permitem a gravação dos dados para um computador, facilitando a recolha e o tratamento dos dados referentes aos esforços.

Os resultados dos esforços de corte são gravados em função do tempo. Para a verificação da calibração inicial do sistema foram utilizadas massas calibradas

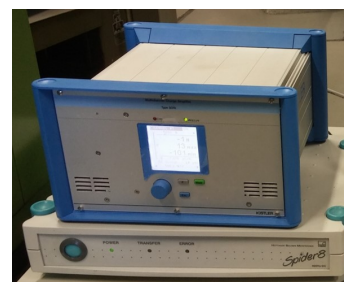


Figura 3.9: Amplificador de carga *KISTLER 5070* (cima), com sistema de medição de esforços *HBM Spider8* (baixo)

e feitos ajustes no sistema de aquisição de dados. Antes do início de cada ensaio de maquinagem foi realizado o zero do sistema de modo a eliminar valores residuais e espúrios de esforços.

3.2.2.5 Ensaios de Maquinagem

O objetivo destes ensaios é a caracterização da maquinabilidade das ligas de latão, com vista a selecionar os parâmetros de corte ideais tendo em conta o acabamento superficial, os esforços de corte transmitidos à ferramenta e o tipo de apra resultante.

A maquinagem de ligas de latão com e sem Pb não foi, até à data, muito explorada em trabalhos de investigação, pelo que a escolha dos parâmetros de corte para o presente programa experimental foi baseada nos poucos estudos realizados para estas ligas. Para além dos trabalhos realizados, a escolha dos parâmetros teve também em atenção as limitações do equipamento de ensaio e a adequação à ferramenta de corte. De acordo com os trabalhos realizados consultados, foram definidas velocidades de corte entre os 80 e os 430 m/min aproximadamente, avanços entre 0.05 e 0.25 mm/rot e profundidades de corte de 0.25 até 1.5 mm [3, 40, 48, 52, 53, 57]. De modo aproximado pode-se afirmar que a gama de velocidades de corte utilizada se encontra entre os 100 e os 400 m/min. Para a velocidade de corte mais baixa, que se obteve com uma frequência de rotação de 630 rpm, existem limitações na cadeia cinemática do torno que não permitiram realizar o avanço mais reduzido de 0.05 mm/rot. Assim, apenas dois dos três avanços selecionados para as outras velocidades de corte foram realizados: 0.14 e 0.25 mm/rot. Para as outras velocidades de corte (frequências de rotação superiores) já foram usados 3 valores de avanço distintos: 0.05, 0.14 e 0.25 mm/rot. Todos os provetes foram sujeitos à mesma sequência de testes, de modo a permitir uma comparação mais equitativa entre os diferentes materiais, minimizando eventuais fontes de incerteza dos ensaios, tais como variações nas distribuições espaciais de porosidades e/ou na composição química. Para além da pastilha de corte utilizada ser sempre a mesma, procuraram-se manter todos os elementos imobilizados e constantes, para reduzir variações e/ou perturbações nos ensaios.

A sequência dos ensaios está esquematizada na Tabela 3.2 e a codificação de cada um é apresentada na Tabela A.1 (ver Anexo A). Cada ensaio corresponde à maquinagem num comprimento de maquinagem de 40 mm mantendo a velocidade de corte e profundidade de corte (mesmo diâmetro do provete) são maquinados 3 comprimentos de maquinagem de 40 mm consecutivos para os três valores distintos de avanço, perfazendo um comprimento total de 120 mm. Ou seja, para cada profundidade de corte e velocidade de corte, é maquinada uma extensão de 120 mm de um total de 180 mm, que corresponde ao comprimento total do provete. A restante extensão do provete não é maquinada e serve para conferir estabilidade na fixação ao torno. Com as sucessivas passagens e profundidades, o diâmetro dos provetes passa de 55 mm iniciais para 37 mm finais. No decorrer dos ensaios foi utilizado um contraponto para conferir uma maior estabilidade do provete. O diâmetro mínimo de 37 mm foi definido de modo a evitar deformações excessivas do provete ou vibrações indesejáveis durante a maquinagem.

Tabela 3.2: Matriz de ensaios de torneamento

n	a_p	f_n	V_c		n	a_p	f_n	V_c
rpm	mm	mm/rot	m/min		rpm	mm	mm/rot	m/min
2500	0.25	0.05	431.97		900	0.25	0.05	130.06
		0.14					0.14	
		0.25					0.25	
	0.5	0.05	428.04			0.5	0.05	128.65
		0.14					0.14	
		0.25					0.25	
	1.5	0.05	420.19			1.5	0.05	125.82
		0.14					0.14	
		0.25					0.25	
1800	0.25	0.05	285.57		630	0.25	0.14	82.14
		0.14					0.25	
		0.25					0.25	
	0.5	0.05	282.74			0.5	0.14	81.15
		0.14					0.25	
		0.25					0.25	
	1.5	0.05	277.09			1.5	0.14	79.17
		0.14					0.25	
		0.25					0.25	

Embora na maioria dos ambientes industriais e, em particular na GROHE, a maquinagem não seja feita sem o recurso a fluidos de corte, os ensaios experimentais decorreram sem qualquer utilização de fluidos. A utilização de fluidos seria mais correta, contudo, seria necessário ter em conta na análise de dados mais uma variável do processo, o que representaria um maior número de ensaios. O uso de fluidos de corte implicaria também o isolamento dos equipamentos para não haver dispersão e ter um maior controlo dos fluidos de corte. A sua ausência permite também que todos os ensaios decorram sempre com as mesmas condições controladas.

Para além da medição dos esforços de corte, a recolha e o registo da apara é também importante. Verificar se a apara é aderente e qual o perfil desta, pode também ser fulcral para a determinação dos parâmetros de corte ideais com vista a uma maior eficiência do processo. Como tal, para cada ensaio, recolheram-se e registaram-se amostras da apara resultantes da maquinagem.

3.2.2.6 Análise de rugosidades

Após cada aquisição dos esforços de corte, foi feito o levantamento do acabamento superficial do provete, para cada uma das condições de ensaio. Este levantamento foi efetuado com o auxílio de um rugosímetro portátil, *Hommel Tester T500*, representado na Figura 3.10.



Figura 3.10: Rugosímetro portátil *Hommel Tester T500* utilizado nos ensaios de torneamento [62]

O equipamento é portátil e bastante versátil, permitindo a medição de várias geometrias e superfícies. A resolução do rugosímetro é de $0.01 \mu\text{m}$ e permite medições com três critérios de rugosidade (R_a , R_z e R_{max}) diferentes. Embora o equipamento tenha três cursos de palpação, verificou-se que apenas o mais comprido ($L_t = 15 \text{ mm}$) era capaz de apresentar valores mais consistentes e com menor erro para toda a gama de medições a realizar. As medições das rugosidades, para cada ensaio, foram realizadas na direção longitudinal do cilindro e segundo duas geratrizes distintas, desfasadas entre si de aproximadamente 180° .

3.2.3 Análise Química e Microestruturas

A análise química e a análise microestrutural irão permitir informação adicional para suportar a análise de resultados, daí a sua grande importância aquando da discussão de resultados. Para além disso, estas análises irão permitir verificar as diferenças microestruturais mais notórias entre as diversas ligas e permitir também verificar variações microestruturais nas diferentes secções do provete, produzidas pelo arrefecimento.

Estas análises foram realizadas em discos de material similares aos que foram preparados para as análises de durezas. A análise química foi feita em todos os discos, utilizando para isso um espectrómetro de massa, capaz de identificar a sua composição química percentual em massa. Após a análise química foram retiradas secções de cada provete (Figura 3.11) e feitos pequenos provetes de teste para a análise microestrutural. Estas amostras foram acondicionadas numa solução de baquelite (resina fenólica) de modo a que estas ficassem com uma estrutura capaz de ser manuseada corretamente sem danificar resultados (Figura 3.12). As amostras foram polidas (Figura 3.13), através de processos convencionais, com lixas abrasivas com SiC, e aplicação de uma suspensão de alumina para facilitar o processo. Após o polimento, e para ter uma correta visualização da microestrutura, foi necessário fazer um ataque químico na superfície do latão. Foi utilizado para tal uma solução aquosa (2 gr. $K_2Cr_2O_4$, 8 mL H_2SO_4 , 4 gr. sal saturado e 100 mL H_2O) própria para ligas de latão. De salientar que, mesmo tendo um composto apropriado para o ataque químico na superfície de ligas de latão, este material é bastante sensível, pelo que pode incorrer nalguma corrosão excessiva aquando do ataque químico. Por fim, foi possível visualizar as várias microestruturas com recurso a um microscópio ótico *Olympus PMG3*.

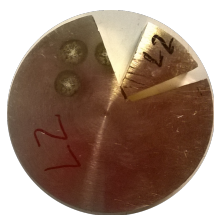


Figura 3.11: Secção de disco para análise microestrutural

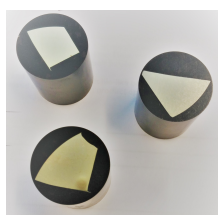


Figura 3.12: Amostras em suporte de resina e polidas

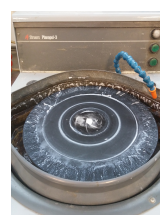


Figura 3.13: Processo de polimento convencional

3.2.4 Ensaio de Dureza

A dureza é uma das propriedades importantes para a caracterização do material. Para tal, foram efetuadas medições de dureza, (Figura 3.14) nas oficinas do DEMec. Dos provetes maquinados, foram retirados discos com 10 mm de espessura, 1 disco de cada provete. No total, foram preparados 6 discos, 2 de cada liga. Foi realizado um ensaio de dureza Vickers (HV, 10 kgf), com um indentador piramidal com ponta de diamante. De notar ainda a necessidade de um intervalo de tempo de espera entre a penetração da pirâmide e a remoção da mesma. Este facto prende-se com a necessidade do material estabilizar a sua deformação e garantir que não haja retrocesso elástico, após a remoção do indentador. No caso de ligas de latão, o intervalo de tempo ronda os $25 \simeq 30$ segundos.



Figura 3.14: Equipamento Dia Testor 2 Rc

Visto que a obtenção dos provetes foi feita recorrendo a vazamento manual, poderá haver alguma variação nas durezas, do centro para a periferia. Nesse sentido, e analisando apenas um dos provetes (neste caso L1), efetuaram-se 3 medições ao centro, 3 numa zona intermédia e 3 na periferia do disco. Para além desta análise, foram feitas medições nos diversos provetes, na zona periférica (zona de maquinagem), zona esta considerada a mais homogênea e aproximada do material (sem grandes porosidades). Cada disco teve então um conjunto de três medições, num total de 18 medições.

3.3 Perspetiva sobre os Esforços

Para o caso da maquinagem das ligas de latão, como visto no capítulo anterior, a diferença entre os esforços de maquinagem das ligas estará essencialmente associada à presença ou não do elemento chumbo. Os esforços de corte esperam-se de maior magnitude no caso da liga Z, e de menor magnitude, e relativamente próximos entre si, nos casos das ligas L e R. A maior contribuição para os esforços de corte será dada pela componente F_c , enquanto que F_a e F_p se prevêem comparativamente mais residuais. As potências e pressões específicas de corte terão a mesma tendência com os parâmetros de maquinagem.

Quanto ao tipo de apara, mais uma vez e devido ao elemento Pb, esperam-se tipos de apara mais curta e quebradiça, para os casos das ligas L e R enquanto que, para a liga Z, se antevêm aparas mais longas e do tipo fita.

As curvas de arrefecimento do provete dão-se do exterior para o interior, pelo que o exterior tem um arrefecimento mais rápido do que o interior. Este gradiente permite que os grãos da zona interior tenham mais tempo para se desenvolver e, com isso, apresentarem maior tamanho do que os grãos da zona exterior do provete. Como o vazamento é manual, é expectável a existência de alguns poros e talvez inclusões, associadas às características do processo. Aliando o tipo de vazamento às curvas de arrefecimento, é expectável uma maior dureza na periferia dos provetes, bem como uma estrutura não tão bem organizada quanto no interior, que deverá apresentar grãos de maior tamanho. A maior presença de Pb nas ligas L e R, resultará numa maior quantidade de glóbulos nas microestruturas correspondentes, derivadas da precipitação de Pb nas juntas de grão.

As rugosidades esperam-se variar consoante o avanço (f_n), apresentando maiores valores para avanços crescentes.

3.4 Análise e Discussão de Resultados

3.4.1 Ensaios de Maquinagem

Os esforços de corte passíveis de serem obtidos com os ensaios de maquinagem, permitem uma análise e escolha mais apropriada dos parâmetros de corte, com os quais se devem maquinar estas ligas de latão. Para cada liga, e consoante a sua composição, o conjunto de parâmetros de corte ideais a aplicar é, pois, diferente. Os 198 ensaios realizados foram distribuídos igualmente por cada provete, 33 em cada um, num total de 66 ensaios para cada liga estudada. Estes ensaios permitem a aquisição de dados tais como os esforços de corte, rugosidades e tipos de apara produzida.

Cada ensaio tem uma tipologia e valores diferentes no que aos esforços de corte diz respeito. O tratamento de dados teve de adotar uma metodologia própria e característica deste tipo de ensaios. A aquisição de dados começa antes do contacto da pastilha de corte no provete, prolongando-se até algum tempo depois do processo de maquinagem ser interrompido. Estes tempos de arranque e paragem, antes e após maquinagem, induzem fenómenos transitórios que não são contabilizados neste estudo. Como ilustrado na Figura 3.15, os dados à esquerda da primeira linha vertical

vermelha e à direita da última linha vertical são automaticamente excluídos. As linhas verticais referidas representam uma exclusão de cerca de 10% do intervalo de resultados, no início e no fim do processo.

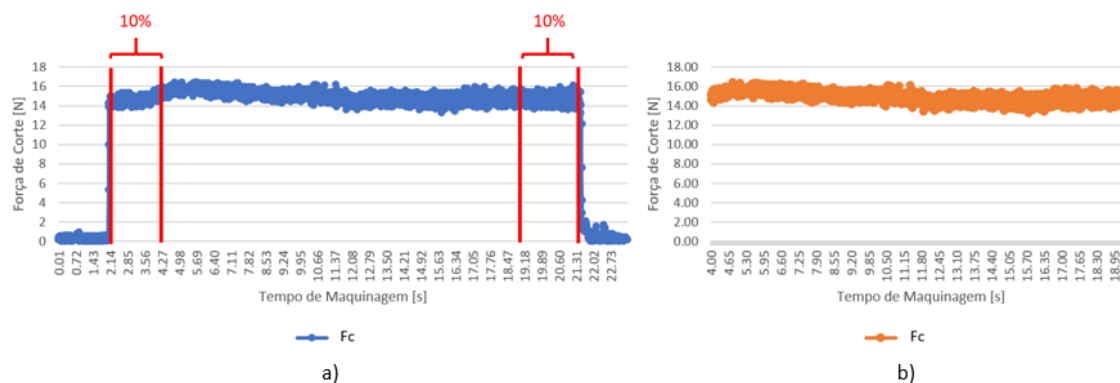


Figura 3.15: Metodologia para tratamento de dados dos ensaios de torneamento: a) espectro completo; b) espectro truncado ($V_c = 431.97$ m/min, $f_n = 0.05$ mm/rot, $a_p = 0.25$ mm, provete L1)

A Figura 3.15 exemplifica, para um dos ensaios, a diferença entre os dados adquiridos pela célula de carga e os dados truncados, que serão utilizados posteriormente para análise.

A influência do chumbo na maquinagem é bastante notória e, de modo a comprovar essa mesma diferença, apresenta-se a Figura 3.16 capaz de diferenciar os esforços de corte das ligas com e sem chumbo e ainda apresentar um perfil aproximado dos esforços de corte dos ensaios (neste caso F_c).

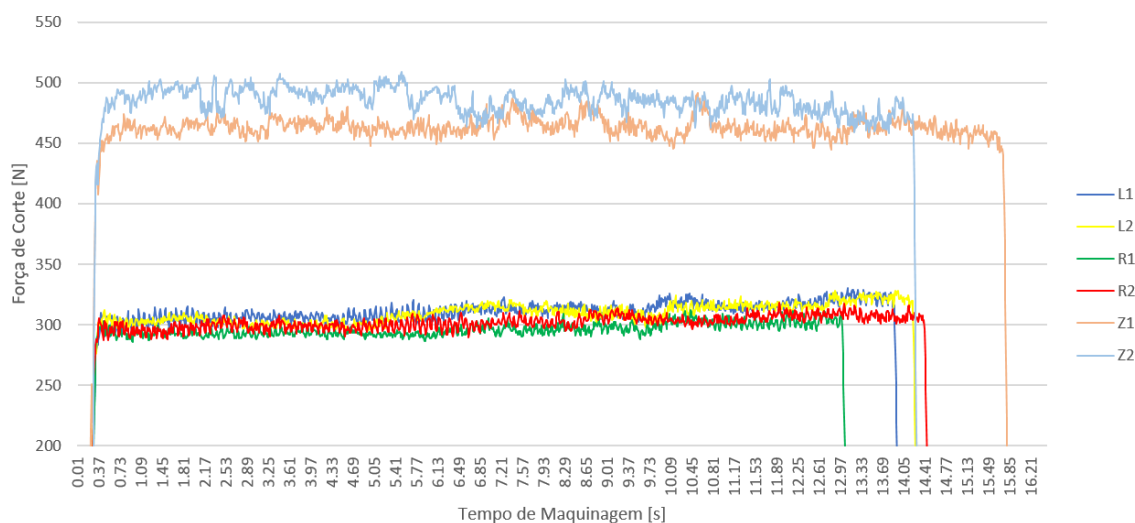


Figura 3.16: Variação da força de corte (F_c) com a variação da composição do elemento Pb nas ligas, para $V_c = 79.17$ m/min, $f_n = 0.25$ mm/rot, $a_p = 1.5$ mm

Como é possível verificar na Figura 3.16, a liga Z, representada por Z1 e Z2 é aquela que mais esforços de corte acarreta. Embora na Figura 3.16 apenas esteja representado um único conjunto de parâmetros de corte e uma só componente da força de maquinagem, a tendência para que as ligas com menor conteúdo de chumbo apresentem maiores esforços mantém-se com os restantes parâmetros de corte. Os valores médios aritméticos (média de dois provetes) da força de corte para as ligas L, R e Z são de 310, 299 e 475 N, respetivamente, para os parâmetros considerados. A diferença, neste caso, representa um acréscimo de cerca de 58% ao nível da força de corte para a liga Z. De realçar que nesta figura a liga com maior conteúdo de chumbo, representada por R1 e R2, é a liga cujos gráficos se encontram mais abaixo. Apesar das ligas R e L terem alguma diferença nos valores da força de corte entre si, estes são bastante similares entre si. Embora a diferença entre as composições químicas de Pb em R e L seja significativa (de 1.45% para 0.9%, respetivamente), a diferença nos esforços de maquinagem não é significativa ($\simeq 3\%$). Sabendo que, para além do zinco e do cobre, os restantes elementos das ligas podem ser considerados residuais, não é possível afirmar que a composição percentual de chumbo é inversamente proporcional aos esforços de corte. Existe sim um incremento dos esforços de corte com a diminuição do conteúdo de Pb das ligas.

Da análise da Figura 3.16 é também possível fazer outras inferências, nomeadamente quanto à dispersão dos tempos de maquinagem entre as ligas, que deveriam ser, idealmente, iguais. Tais diferenças prendem-se com o facto de a máquina de ensaios (torno mecânico) transmitir algumas vibrações, antes e durante o processo de maquinagem propriamente dito, de o varão não ter sido sempre maquinado na totalidade (pormenor na Figura 3.17) e de existirem ainda pequenas instabilidades/variações da célula de carga, responsável pela aquisição dos dados. No entanto, tal facto não tem qualquer relevância para o estudo realizado, pois estas pequenas diferenças nos tempos de maquinagem não interferem com a obtenção de condições estáveis de maquinagem e por conseguinte com os valores médios dos esforços.

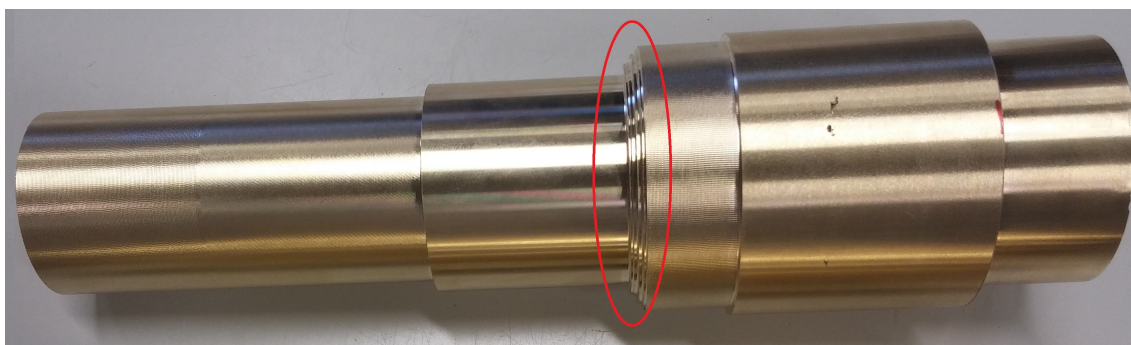


Figura 3.17: Pormenor de um dos varões maquinados evidenciando a diferença no comprimento de maquinagem

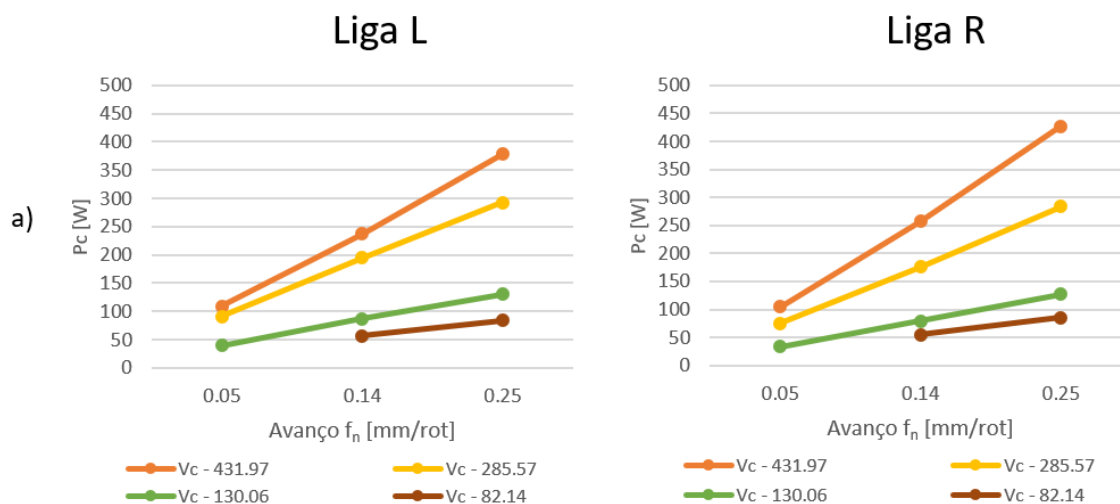
A pequena vibração detetada através da oscilação dos esforços medidos foi sempre da mesma ordem de grandeza para todos os ensaios, não se denotando o desenvolvimento de uma aderente que seria responsável quer por uma alteração da ordem de grandeza, quer pelo período destas

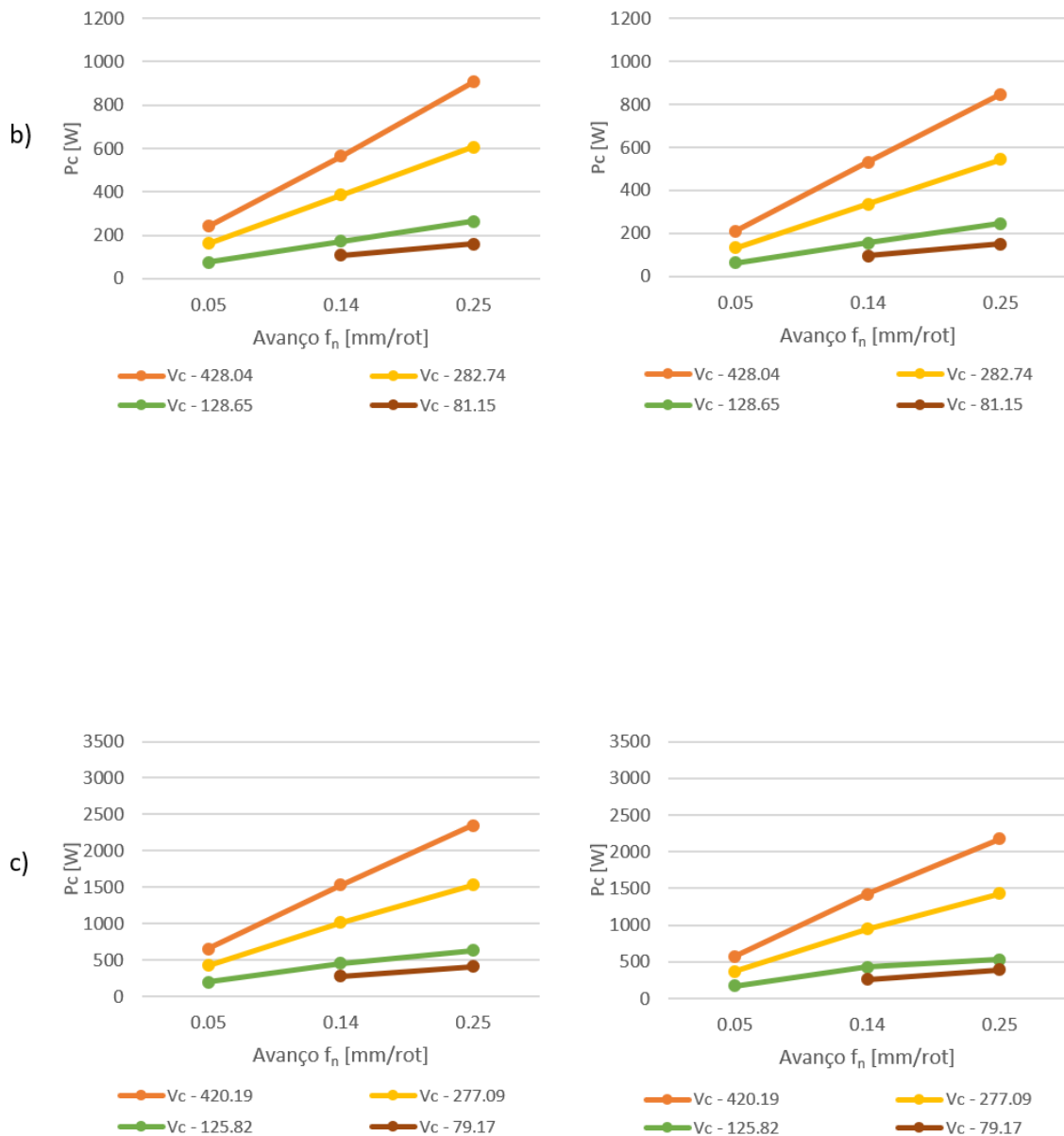
vibrações. Também a relativamente pequena oscilação de resultados denota uma razoável homogeneidade na microestrutura da liga. Isto é, não deverá existir um grande número de inclusões e/ou outros contaminantes. A presença destes elementos na superfície maquinada faria com que houvessem alguns picos, visíveis nas curvas. A oscilação de pequena amplitude observada pode ser originada por vibrações induzidas pelo processo de maquinagem e pela fratura e fragmentação da apara.

3.4.1.1 Potências de Corte

A potência de corte é um dos parâmetros utilizados para medir a quantidade de energia requerida por unidade de tempo para remover o material durante o processo de maquinagem. Este parâmetro é uma medida energética associada ao processo que, com a análise dos parâmetros de corte (velocidade de corte (V_c), avanço (f_n) e profundidade de corte (a_p)), permite uma otimização do processo.

Foram analisadas as potências de corte ($P_c = F_c \cdot V_c$) para todos os ensaios realizados. Nas Figuras 3.18a e 3.19 apresentam-se os resultados das potências de corte para cada uma das ligas testadas, sendo os valores apresentados, a média dos valores de dois ensaios realizados para cada liga.





(a) Potências de corte das ligas L e R, em função do avanço e velocidade de corte: a) $a_p = 0.25$ mm; b) $a_p = 0.5$ mm; c) $a_p = 1.5$ mm

Como visto anteriormente (ver Figura 3.16), na generalidade dos casos a liga Z apresenta maiores potências de corte do que as outras ligas. Para os mesmos parâmetros de corte, a influência do elemento Pb, na composição química, é responsável por um incremento notório das potências. Com estes dados, é de prever também que as pressões específicas de corte, bem como os esforços de corte associados sejam superiores no caso da liga Z. As ligas L e R apresentam mais uma vez resultados muito semelhantes, apresentando a liga L potências de corte ligeiramente superiores.

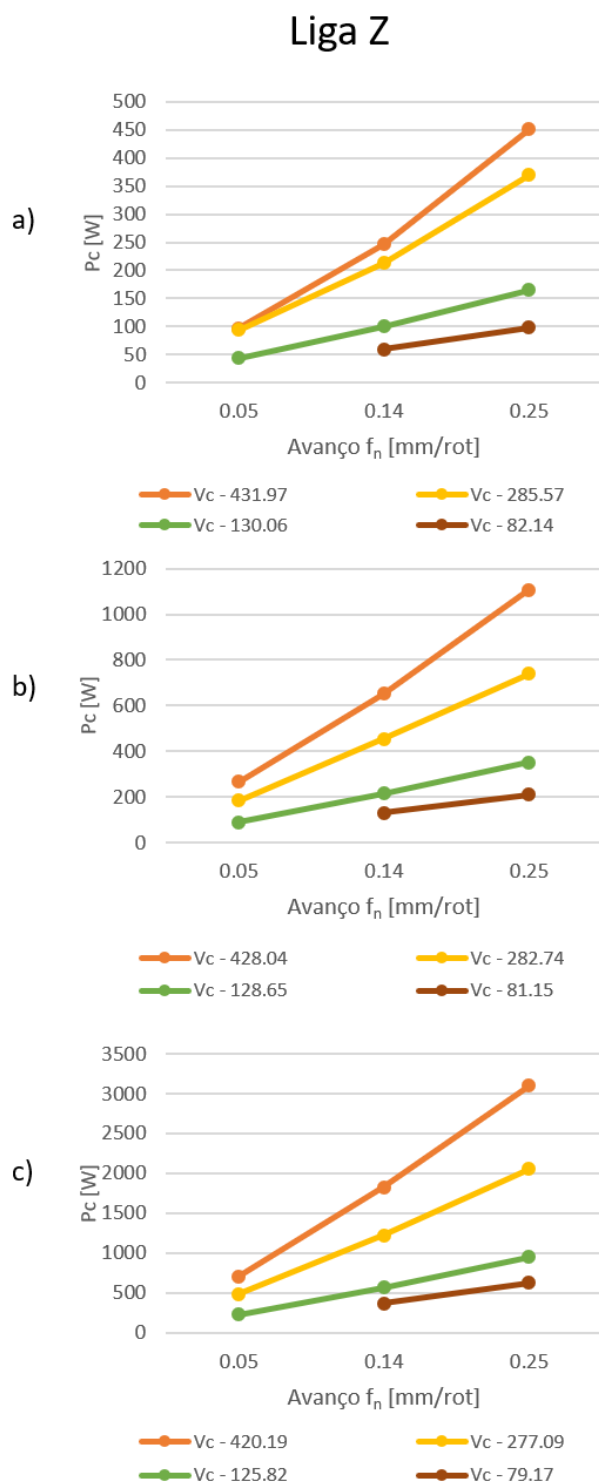


Figura 3.19: Potências de corte da liga Z, em função do avanço e velocidade de corte: a) $a_p = 0.25$ mm; b) $a_p = 0.5$ mm; c) $a_p = 1.5$ mm

A velocidade de corte é um dos parâmetros com grande influência nos resultados (teoricamente existe um aumento linear da potência com a velocidade de corte). Com o aumento da velocidade

de corte, assiste-se a um aumento significativo da potência de corte necessária para o processo. Para todos os casos, o aumento mais notório das potências dá-se entre as velocidades de corte de ~ 130 e ~ 280 m/min. As potências das duas velocidades mais baixas apresentam-se com pouca diferença entre si, devido também à sua proximidade numérica ($V_c \sim 80$ e ~ 130 m/min).

O avanço tem também bastante influência nas potências de corte, como se pode verificar nas Figuras 3.18a e 3.19. O efeito deste parâmetro é notório, já que a sua subida provoca um aumento dos esforços e, por consequência, das potências de corte. Este efeito é verificado em praticamente todos os casos, à exceção das ligas L e R, para a_p igual a 1.5 mm e V_c de 79 e 126 m/min. A análise das mesmas figuras sugere ainda que o aumento da potência de corte é tanto maior quanto maior for o avanço dado. Importa também salientar que os materiais comportam-se de modo bastante linear com o avanço e a velocidade de corte na generalidade dos ensaios.

O volume de material removido depende também da profundidade de corte, parâmetro onde se verifica a maior diferença de carga no processo. Com a passagem de a_p de 0.25 para 0.5 mm, as potências de corte tem um aumento de perto de 100%. Quando a_p toma o valor de 1.5 mm, as potências sofrem um incremento de mais de 100%.

Para uma melhor perceção numérica dos valores em causa, foi realizada uma análise de custos energéticos com base nestes resultados. Para um comprimento de maquinagem, $l = 10$ mm, foram calculados os respetivos tempos de maquinagem (Tabela A.2, ver anexo A). Com esses tempos e com a potência de corte respetiva, foi possível obter os custos energéticos associados a cada conjunto de parâmetros (Tabela A.3). Os resultados que são apresentados não contemplam qualquer variável de desgaste nas ferramentas. O melhor resultado desta análise será a conjugação da menor V_c com o maior f_n , sem ter em conta a produtividade. Considerando a produtividade, os custos sofrem uma grande variação, pois será necessário ter em conta para além dos custos da energia, os custos do uso das máquinas, desgaste de ferramentas, tempo de operadores, entre outros.

3.4.1.2 Pressão Específica de Corte

Com vista à otimização e previsão dos esforços de corte envolvidos no processo de maquinagem, foi também calculada a pressão específica de corte, para os vários ensaios realizados. Este parâmetro, que pode ser usado para estabelecer o índice de maquinabilidade de um material, pode também ser utilizado para estimar os esforços de corte em operações de maquinagem que envolvam o material em questão.

A pressão específica de corte é dada pela razão entre a potência de maquinagem e a taxa de remoção de material ou a razão entre a força de corte (F_c) e a área de secção da apara não deformada (S) que, por sua vez, é o produto da profundidade de corte (a_p) pelo avanço (f_n) (Equação 2.8). Embora seja útil a análise da variável área de secção, será mais produtivo a análise da profundidade de corte e do avanço em separado, para a otimização dos parâmetros de corte na empresa.

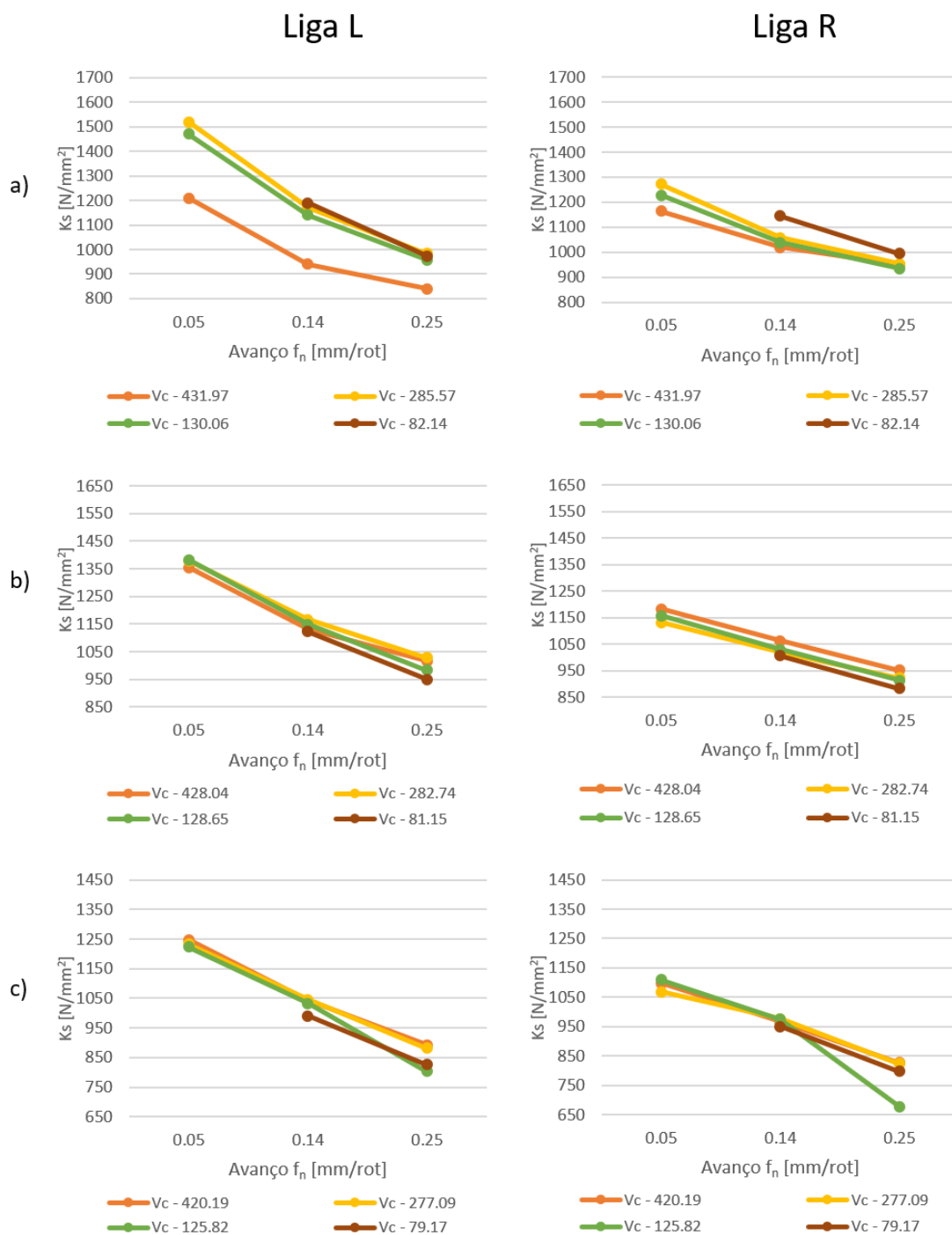


Figura 3.20: Pressões específicas de corte das ligas L e R, em função do avanço e velocidade de corte: a) $a_p = 0.25$ mm; b) $a_p = 0.5$ mm; c) $a_p = 1.5$ mm

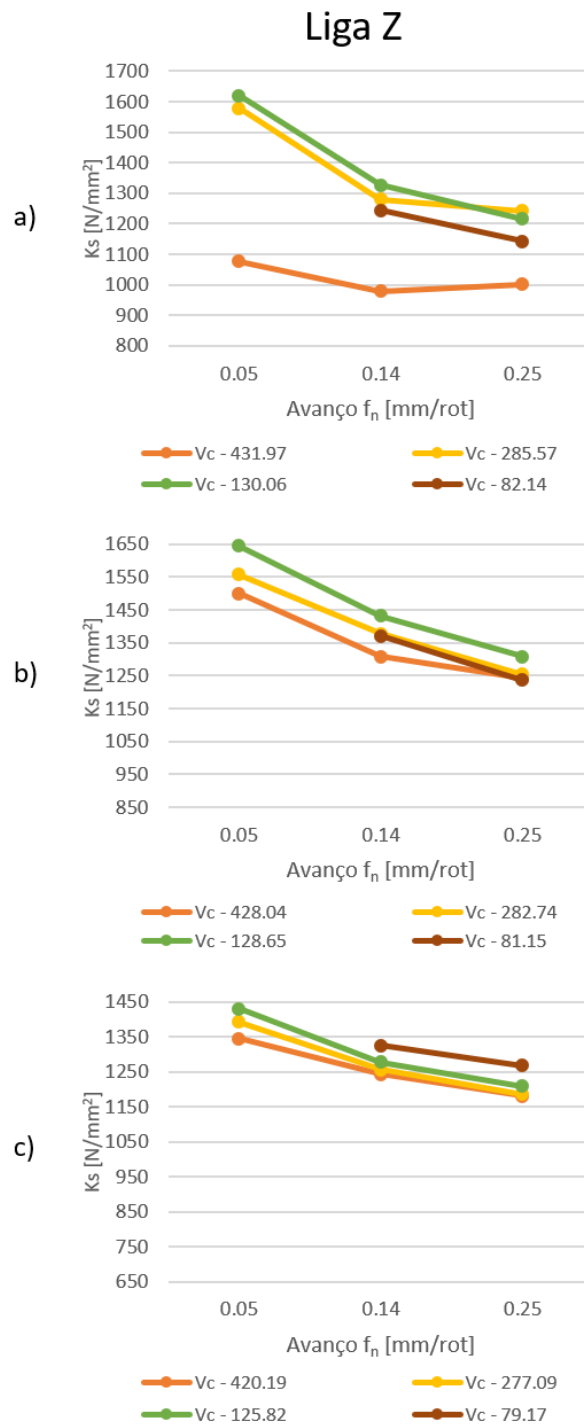


Figura 3.21: Pressões específicas de corte da liga Z, em função do avanço e velocidade de corte: a) $a_p = 0.25$ mm; b) $a_p = 0.5$ mm; c) $a_p = 1.5$ mm

Para a pressão específica de corte, a velocidade de corte não é um fator tão diferenciador quanto nas potências. A Figura 3.20 mostra que, para $a_p = 0.25$ mm (caso a)), as pressões específicas de corte são tanto mais altas, quanto menor for a velocidade de corte. Para o caso de a_p , igual a 0.5 mm e 1.5 mm (caso b) e c), respetivamente), os valores de K_s são já bastante mais próximos entre

si, não havendo aparente influência de V_c . No caso da liga Z, V_c exerce maior influência, sendo que o seu efeito vê-se diminuído com a_p . Para crescentes profundidades de corte, existe uma certa convergência entre as pressões específicas de corte. A pressão específica de corte apresenta-se, genericamente para a liga Z, menor com o aumento da velocidade.

A pressão específica de corte atinge sempre os valores máximos para a área de secção mínima, ou seja, com os menores avanços e menores profundidades de corte. O avanço (f_n) tem alguma influência em K_s mas, como a velocidade de corte, não tem um impacto muito significativo. De um modo geral, para as três ligas em análise, com o aumento do avanço, assiste-se a um decréscimo de K_s , relativamente linear. A profundidade de corte, à semelhança dos outros dois parâmetros, aparenta ter pouca influência em K_s . O aumento da profundidade conduz a pressões específicas de corte mais baixas. A ordem de grandeza deste parâmetro ronda os 900-1300 N/mm².

Em consonância com o revisto na literatura, a utilização de profundidades de corte elevadas, levam a que a pressão específica de corte tenda a convergir. No caso das ligas L e R esta convergência ocorre entre os 800 e os 1000 N/mm² enquanto que, para a liga Z, ocorre no intervalo de 1200 a 1270 N/mm². De acordo com a Tabela 2.7 e com as Figuras 3.20 e 3.21, é de prever alguma variação entre as durezas das ligas L, R e Z, estando L e R próximas entre si. Como tal, antevê-se que os resultados das durezas experimentais concordem com os dados da Tabela 3.1.

3.4.1.3 Esforços de Corte

O presente subcapítulo visa apresentar os esforços de corte, relativos aos ensaios de torneamento, utilizados igualmente para a validação das inferências feitas nas subsecções anteriores. Para tal, a Figura 3.22 ilustra as forças de corte (F_c) relativas aos ensaios efetuados. A força de avanço (F_a) e a força de profundidade de corte (F_p) são algo residuais, pelo que a sua análise não é considerada tão relevante quanto as forças de corte, F_c . Os valores experimentais obtidos para todos os esforços de corte encontram-se representados em Anexo (Figuras A.2, A.3 e A.4).

Tal como revisto para K_s , V_c não tem uma grande influência nas forças de corte. As forças de corte apresentam-se relativamente constantes, apesar de um suave aumento de F_c com V_c . O avanço, f_n , provoca, de um modo geral, para as três ligas, um aumento da força de corte, F_c . A profundidade de corte é dos parâmetros que mais tem influência nos resultados. Para as ligas L e R, os valores de F_c praticamente duplicam, entre cada profundidade de corte ensaiada (caso a), b) e c)). Para o caso da liga Z, o efeito da profundidade de corte parece ser ainda maior do que nas outras duas ligas. De acordo com a pesquisa bibliográfica realizada, os resultados estão coerentes, pois era de prever uma proporcionalidade entre as forças de corte e as profundidades de corte [52].

Quer nas potências, quer nas pressões de corte anteriormente analisadas, é a liga Z que apresenta os valores mais elevados. De igual forma sucede com as forças de corte, o que demonstra a grande influência do elemento Pb, que, maioritariamente, difere as ligas. A liga Z atinge forças de corte no valor de 450 N, enquanto que as restantes ligas atingem apenas os 300 N.

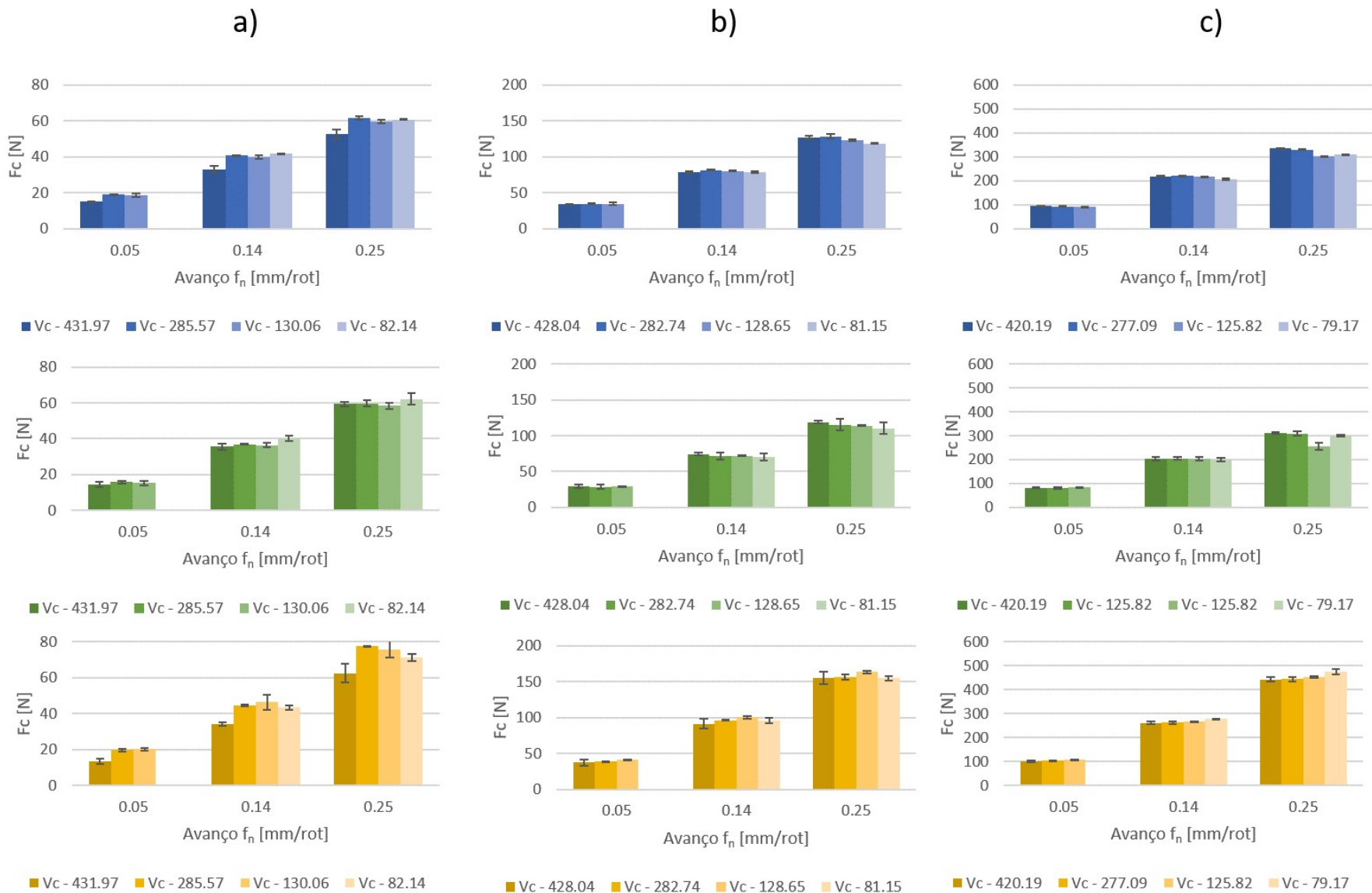


Figura 3.22: Esforços de corte, F_c , para as três ligas: L (azul), R (verde) e Z (amarelo), em função do avanço e velocidade de corte: a) $a_p = 0.25$ mm; b) $a_p = 0.5$ mm; c) $a_p = 1.5$ mm

3.4.2 Apara

Para os 198 ensaios realizados, foi recolhida e registada a apara para cada conjunto de parâmetros, para os 6 provetes. Dessa análise, apresentam-se de seguida as Figuras 3.23, 3.24, 3.25 e 3.26, que ilustram a apara típica de cada ensaio obtida na maquinagem das 3 ligas, em todas as condições ensaiadas (99 registos).

Da análise das figuras acima, é possível observar uma certa periodicidade do tipo de apara para as ligas L e R. Esta repetibilidade é visível a cada três ensaios, até ao ensaio 27 inclusive, após o qual apenas são feitos dois avanços ($f_n = 0.14$ e 0.25 mm/rot). A sequência de apara que se repete é a de uma apara longa e helicoidal (para $f_n = 0.05$ mm/rot), seguida de uma apara em arco (para $f_n = 0.14$ mm/rot) e um terceiro e último tipo de apara fragmentado e lascado (para $f_n = 0.25$ mm/rot). Para as ligas L e R é também possível verificar que, para uma mesma velocidade de corte, o aumento da profundidade de corte implica a transição de apara helicoidal em gume para helicoidal cónica. Da análise a estas duas ligas verifica-se também que a apara é bastante semelhante e que a sequência de repetição em pouco é afetada pela velocidade de corte.

A liga Z é analisada em separado pois o tipo de apara difere bastante das restantes ligas. Os tipos de apara são bastante diferentes, apresentando sobretudo aparas em fita e helicoidais em gume. Na liga Z não parece existir grande sensibilidade aos parâmetros de corte. Apenas de notar que, para velocidades decrescentes, a partir do ensaio 19 ($V_v = 130$ m/min), a apara é sempre helicoidal em gume. A quebra da apara dá-se apenas para as condições dos ensaios 9 e 18 ($V_c = 420.19$ m/min e $V_c = 277.09$ m/min, respetivamente e $f_n = 0.25$ mm e $a_p = 1.5$ mm para ambos os casos).

Em todos os ensaios efetuados é de salientar que o tipo de apara se manteve constante no decorrer dos mesmos. Esta observação confirma também os resultados obtidos na secção anterior onde os esforços de maquinagem se mantêm constantes ao longo de cada ensaio.

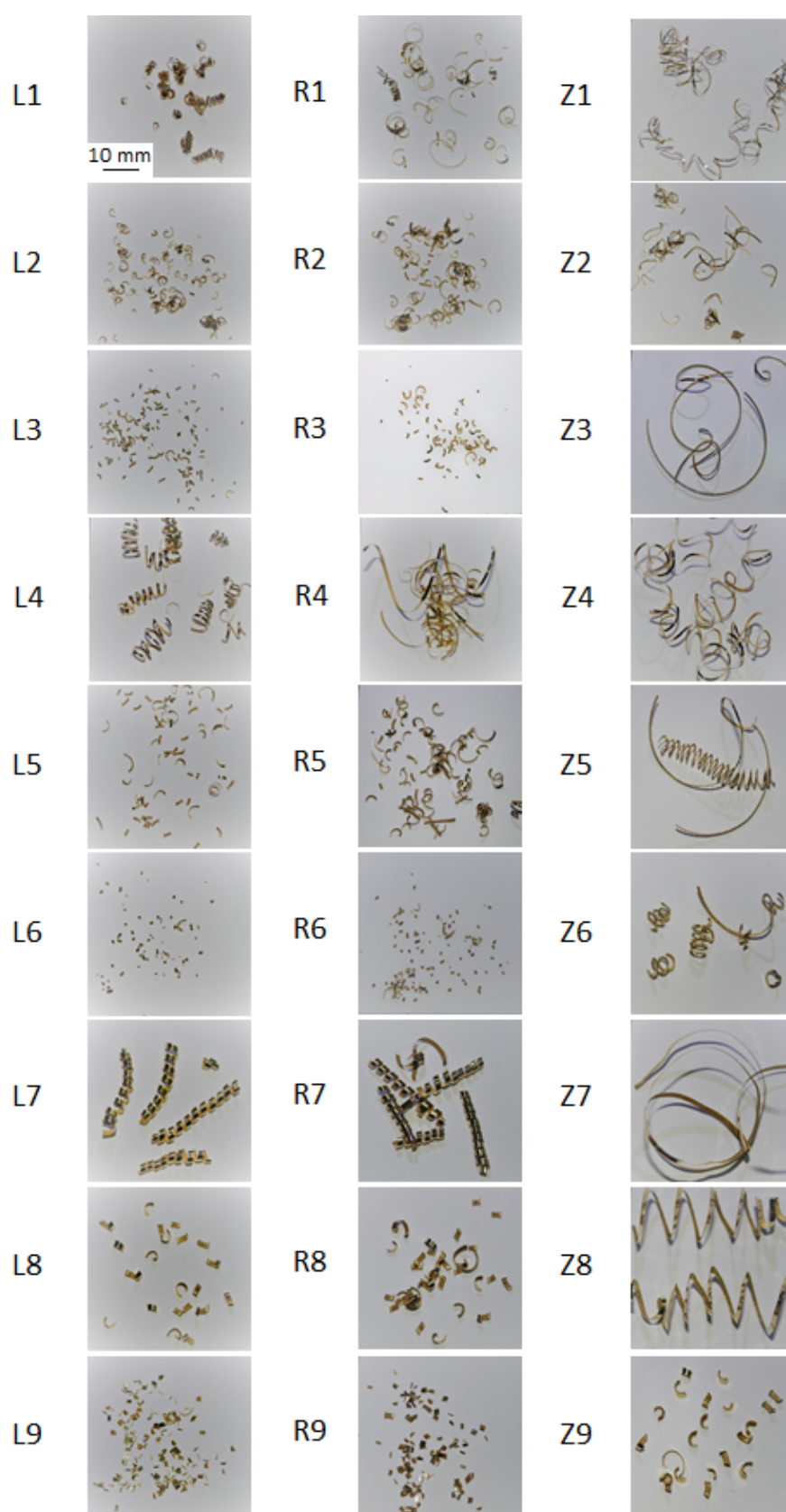


Figura 3.23: Pormenor da apara obtida nos ensaios 1 a 9 das ligas L, R e Z (código de ensaios - ver Tabela A.1)

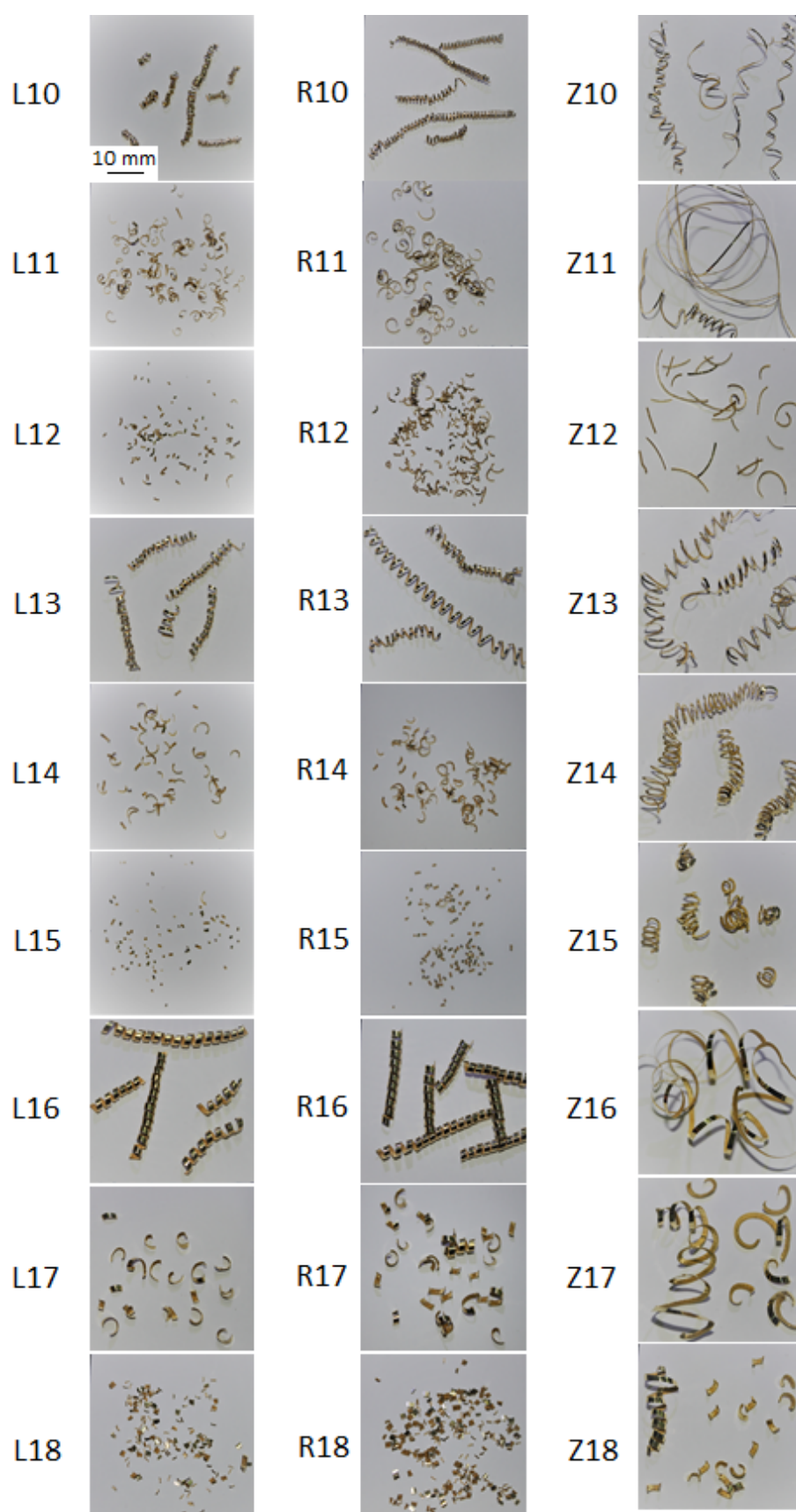


Figura 3.24: Pormenor da apara obtida nos ensaios 10 a 18 das ligas L, R e Z (código de ensaios - ver Tabela A.1)

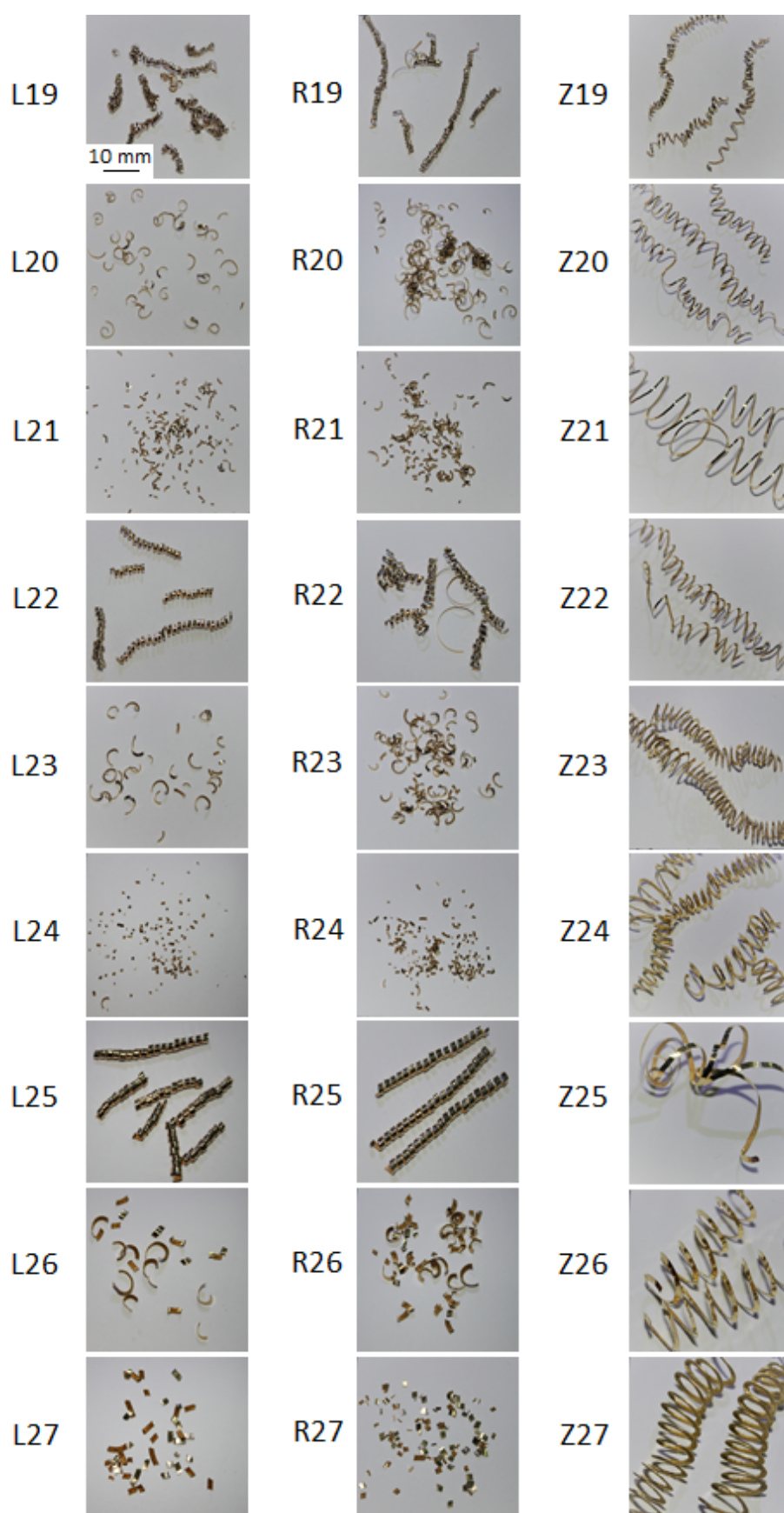


Figura 3.25: Pormenor da apara obtida nos ensaios 19 a 27 das ligas L, R e Z (código de ensaios - ver Tabela A.1)

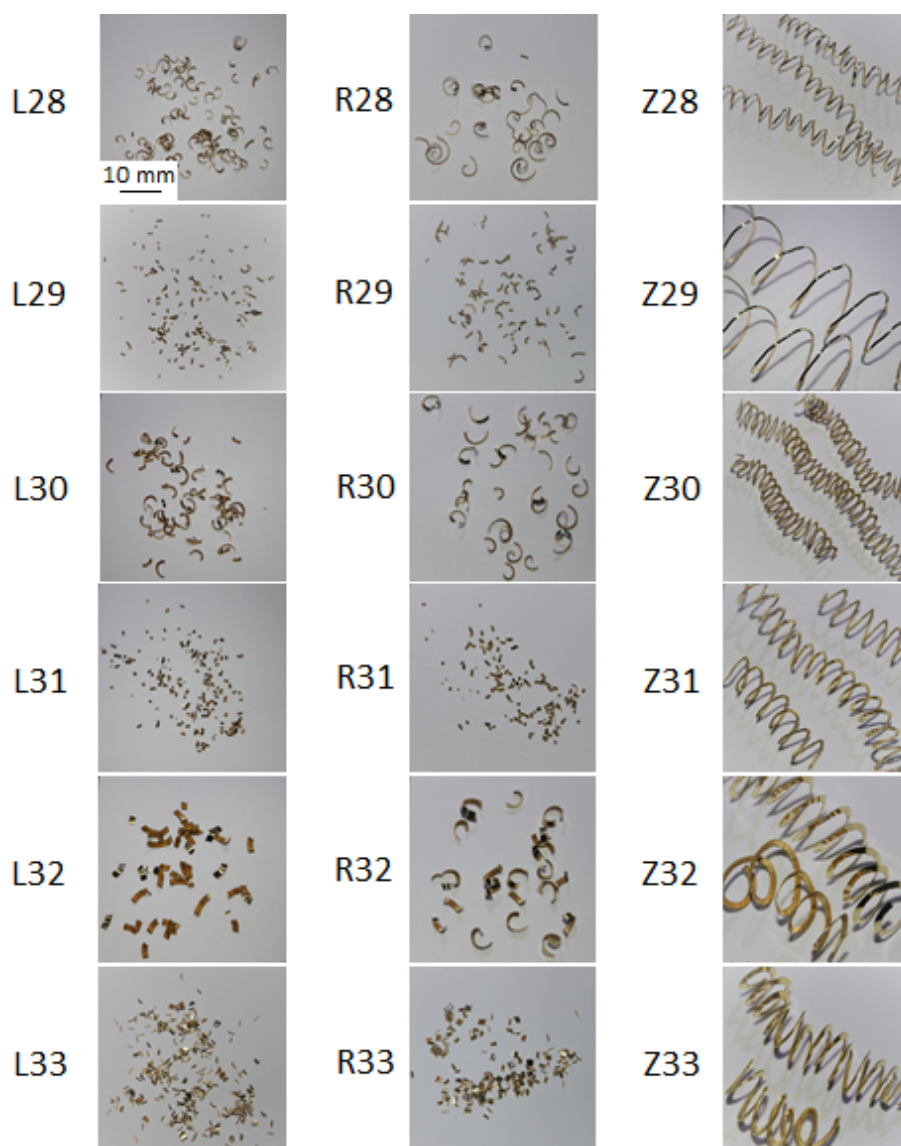


Figura 3.26: Pormenor da apara obtida nos ensaios 28 a 33 das ligas L, R e Z (código de ensaios - ver Tabela A.1)

3.4.3 Ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza permitem determinar uma das muitas propriedades mecânicas importantes para a caracterização do material. A utilização destes ensaios pressupõe a análise da marcação deixada por um material mais duro, neste caso um identador de diamante. Após a compressão de um identador em forma de pirâmide, em diamante, sobre o latão, mediram-se as diagonais do perfil impresso na superfície (em mm). A dimensão média das diagonais é depois convertida em dureza HV, utilizando tabelas de conversão apropriadas para o efeito.

Através dos resultados obtidos aquando da análise microestrutural, que se realizou em primeiro lugar, mas que apenas será abordada mais adiante, não se verificou qualquer impacto e/ou variação da microestrutura consoante a distância ao centro. Visto que a dureza depende fortemente da

microestrutura do material, pressupôs-se que a mesma não iria variar consoante a distância ao centro. Tal facto levou a que apenas se utilizasse um provete de ensaio, L1, para confirmar ou não esta suposição (Tabela 3.3).

Tabela 3.3: Análise da dureza das ligas de latão e da influência da distância ao centro do provete

Zona	Provette	HV			\overline{HV}
Centro	L1	121.9	115.9	118.9	118.9
Meio	L1	115.9	118.9	118.9	117.9
Periferia	L1	115.9	118.9	121.9	118.9

De acordo com os resultados acima apresentados, a distância ao centro não implica qualquer variação na dureza do material testado, o que valida a hipótese acima apresentada. Este facto permite, com maior segurança, traçar algumas conclusões das secções anteriores, visto que se pode considerar o material relativamente homogéneo, no que à dureza diz respeito. No entanto, as durezas obtidas, $\simeq 115$ HV, apresentam-se bastante acima dos valores inicialmente utilizados como referência, 75 HV (convertidos de 70 HB). Para ter resultados mais conclusivos e referentes às restantes ligas, foram efetuados mais ensaios de dureza, com vista à determinação das durezas de cada liga (Tabela 3.4).

Tabela 3.4: Análise da dureza das ligas de latão na periferia dos provetes

Provette	HV			\overline{HV}
L1	115.9	118.9	121.9	118.9
L2	115.9	115.9	118.9	116.9
R1	100.3	98	100.3	99.5
R2	93.6	93.6	89.6	92.3
Z1	121.9	102.7	110.3	111.6
Z2	128.4	131.9	126.4	128.9

A análise das durezas foi feita na zona periférica dos provetes pois, assumindo que não há variação da dureza consoante a distância ao centro, bem como o facto de os provetes terem sido maquinados a partir das zonas periféricas, este pareceu ser o procedimento mais coerente.

A dureza da liga Z é, como esperado, a maior das três ligas ensaiadas, cerca de 120 HV, valor concordante com os dados iniciais. Para as restantes ligas, os resultados obtidos são bastante superiores aos valores fornecidos pela empresa. A liga L apresenta uma dureza média de 115 HV e a liga R de 95 HV. De acordo com as secções anteriores e com os dados iniciais fornecidos pela empresa, era expectável que as durezas de ambas as ligas, L e R, fossem mais baixas e próximas entre si ($\simeq 75$ HV).

3.4.4 Composição Química e Microestruturas

A composição química foi feita recorrendo a um espectrómetro de massa, tendo sido feita uma análise para cada provete, seis provetes no total (Tabela 3.5). A Figura 3.27 ilustra um dos discos

em que foi feita essa mesma análise e a zona de onde foi retirada a secção circular para análise microestrutural.

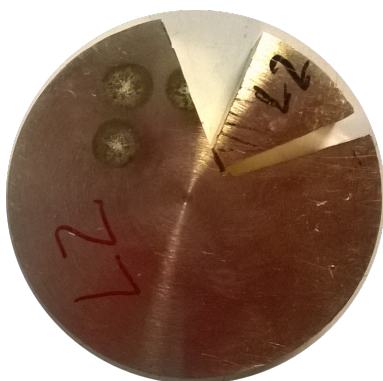


Figura 3.27: Disco com superfície queimada da análise química, com secção para análise microestrutural

Tabela 3.5: Composição química das ligas de ensaio

Elemento %	L1	L2	R1	R2	Z1	Z2
Cu	≈ 59.22	≈ 59.07	≈ 62.67	≈ 62.63	≈ 63.25	≈ 63.89
Zn	38.97	39.10	34.89	35.02	36.00	35.12
Pb	0.894	0.909	1.45	1.46	0.0513	0.159
Sn	0.104	0.104	0.0962	0.0965	0.0102	0.0088
P	0.0025	0.0037	0.0072	0.0057	0.0036	0.0025
Mn	0.0016	0.0016	0.0027	0.0028	<0.0003	<0.0003
Fe	0.0948	0.0953	0.116	0.114	0.203	0.318
Ni	0.0865	0.0855	0.0606	0.0605	<0.0005	0.0012
Si	0.0023	0.0021	< 0.0006	< 0.0006	<0.0006	<0.0006
Mg	0.00025	0.00026	0.00019	0.00019	0.00027	0.00029
Cr	0.0022	0.0022	0.0019	0.0019	0.0003	0.00041
As	0.0140	0.0150	0.0875	0.0872	0.0203	0.0471
Sb	0.0046	0.0046	0.0033	0.0051	<0.0030	0.0091
Cd	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010	0.00075	0.00075
Bi	0.0027	0.0027	0.0023	0.0023	0.00075	0.00068
Co	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	<0.001	<0.001
Al	0.594	0.590	0.506	0.503	0.444	0.438
S	0.0025	0.0030	0.0029	0.0030	0.0029	0.0026
Be	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	<0.0001	<0.0001
B	0.00071	0.00069	0.00056	0.00057	0.00065	0.00078
Se	0.0044	0.0045	0.0038	0.0044	0.0044	0.0036

Na tabela 3.5 resume-se os valores da análise química realizada. A percentagem do cobre é aproximada, pois é obtida através da subtração do somatório de todos os outros elementos a 100%. Da análise da Tabela 3.5 verifica-se que, para provetes da mesma liga, a variação da composição química não é notória. De salientar a diferença entre Z1 (0.0513%) e Z2 (0.159%) no componente Pb, sendo que ambos se encontram dentro das diretivas internas da empresa. Pela percentagem

de zinco, é possível afirmar que a liga L gera latões bifásicos (fases α e β) e as ligas R e Z geram latões intermédios, entre os monofásicos (fase α) e os bifásicos (fases α e β). A menor quantidade de Pb e a maior quantidade de Fe na liga Z, corrobora a análise da secção anterior, onde se comprovam maiores esforços de corte para esta mesma liga.

A distância ao centro dos provetes pode revelar algumas diferenças microestruturais, nomeadamente a existência de porosidades nas regiões mais ao centro do provete. A existência dessas mesmas porosidades pode prender-se com a existência de gradientes de temperatura no arrefecimento. As Figuras 3.28 - 3.33 ilustram o efeito da distância ao centro dos provetes nas microestruturas das várias ligas.

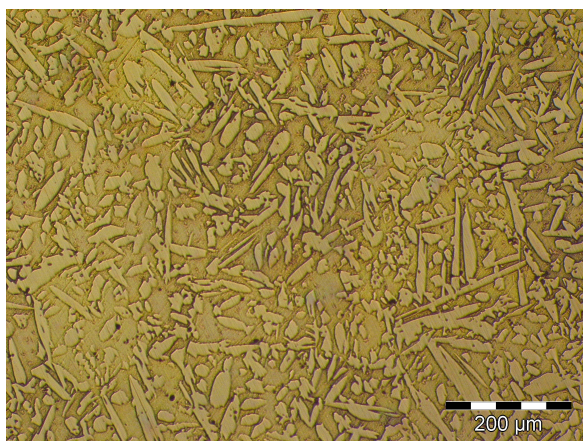


Figura 3.28: Microestrutura da liga L, secção do meio do provete, ampliação de 150x

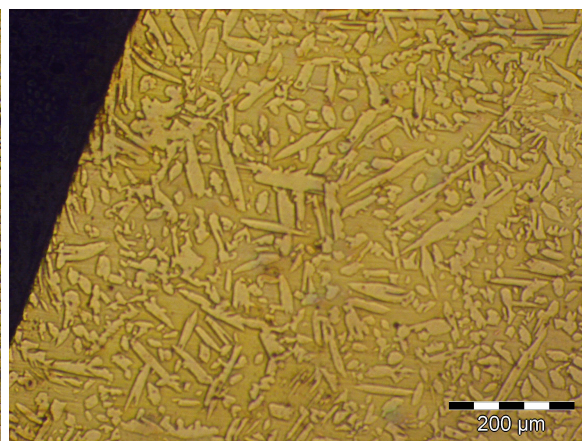


Figura 3.29: Microestrutura da liga L, secção periférica do provete, ampliação de 150x

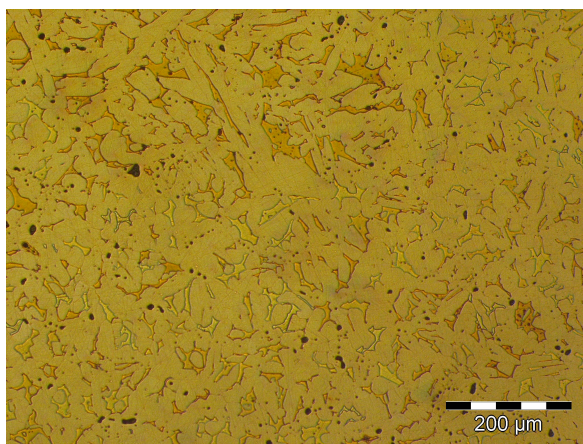


Figura 3.30: Microestrutura da liga R, secção do meio do provete, ampliação de 150x

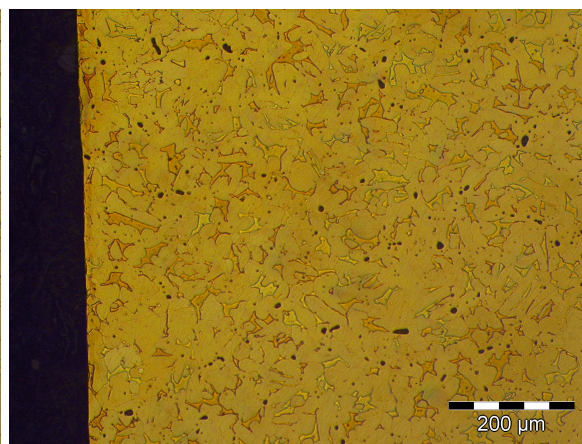


Figura 3.31: Microestrutura da liga R, secção periférica do provete, ampliação de 150x

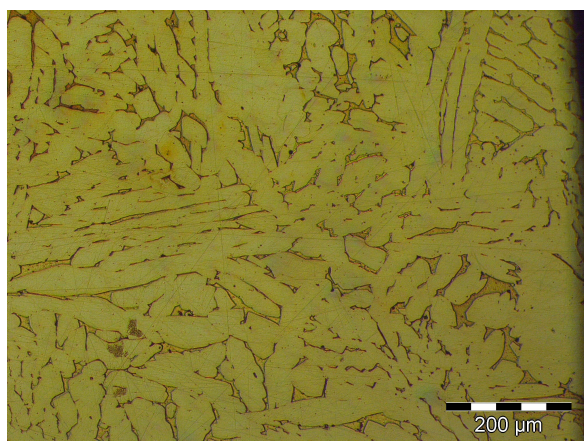


Figura 3.32: Microestrutura da liga Z, secção do meio do provete, ampliação de 150x

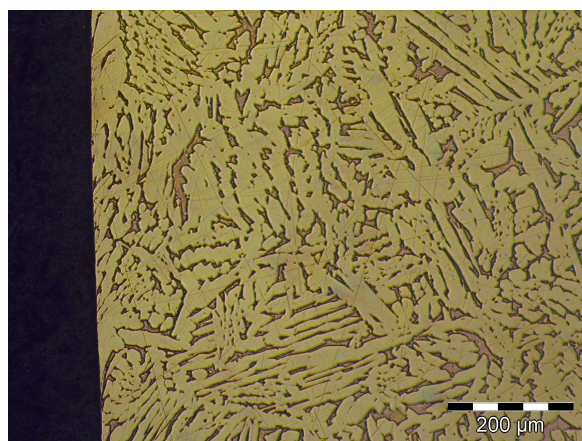


Figura 3.33: Microestrutura da liga Z, secção periférica do provete, ampliação de 150x

Da análise das Figuras 3.28 - 3.33 conclui-se que, tal como as durezas, não existe uma grande variação das microestruturas com a distância ao centro do provete.

Cada liga possui uma composição química ligeiramente diferente das outras, o que resulta em diferentes microestruturas.

A Figura 3.34 ilustra a microestrutura da liga L, retirada de uma secção entre o centro e a periferia do provete. A sua microestrutura apresenta um latão bifásico (α e β), devido à sua composição Cu-Zn (Figura 2.42). A maioria dos pontos negros nas juntas de grão são arredondados, pelo que se assumem ser, à partida, glóbulos de chumbo (esferóides), formados aquando da solidificação do material [63]. Outros pontos que estejam nas juntas de grão e que não sejam arredondados assumem-se ser inclusões e não porosidades, tendo em conta o seu tamanho.

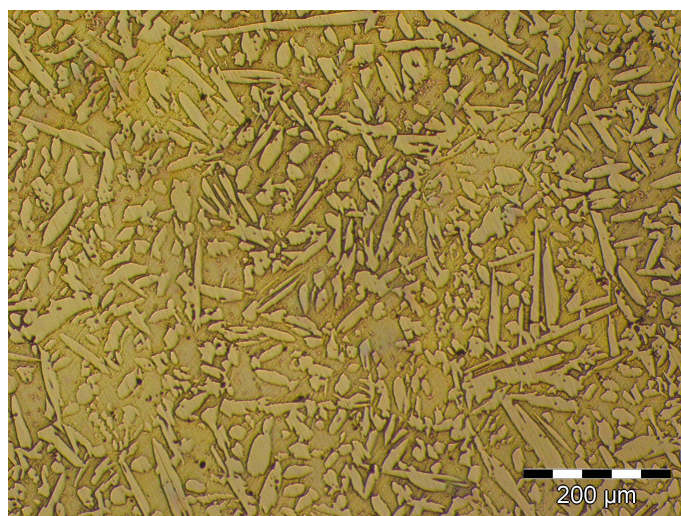


Figura 3.34: Microestrutura da liga L, secção do meio do provete, ampliação de 150x

Esta liga, como tem uma elevada percentagem de Pb (elemento insolúvel na matriz e que precipita nas juntas de grão), ajuda a evitar porosidades e micro-rechupes.

A composição química da liga R, embora similar à da liga L, origina algumas diferenças microestruturais. A estrutura da liga R é de um latão bifásico, com dendrites de fase α juntamente com fase β , mas cujo tamanho dos grãos varia em relação à liga L. O boro, elemento afinador de grão, está em menor quantidade na liga R, pelo que a sua diferença conduz a um maior afinamento de grão na liga L. Embora apareçam alguns pontos escuros do meio das dendrites de fase α , esses

elementos podem surgir tendo em conta o plano em que a amostra foi cortada, ou seja, os pontos escuros podem estar à mesma numa junta de grão, num outro plano de corte do material.

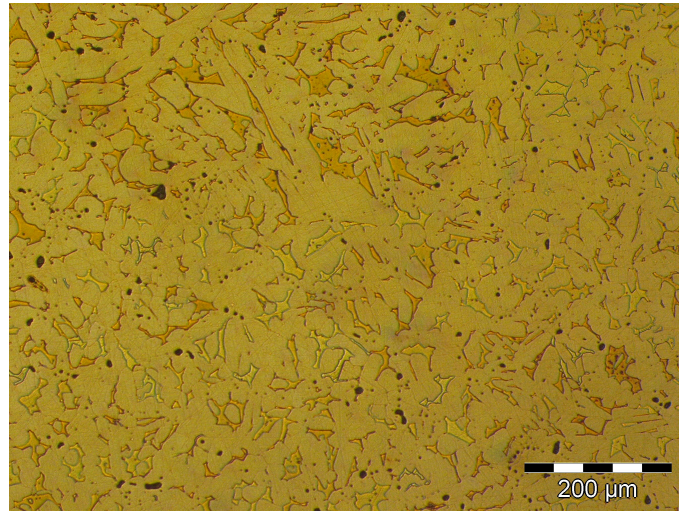


Figura 3.35: Microestrutura da liga R, secção do meio do provete, ampliação de 150x

A microestrutura da liga Z, representada na Figura 3.36, é bastante diferente das restantes ligas. Esta liga apresenta uma composição intermédia entre latões monofásicos (α) e latões bifásicos (α e β). Uma grande presença da fase α é denotada através da quantidade e tamanho das dendrites α , para além da reduzida quantidade de Pb, evidenciada com o raro aparecimento de esferóides junto das fronteiras de grão.

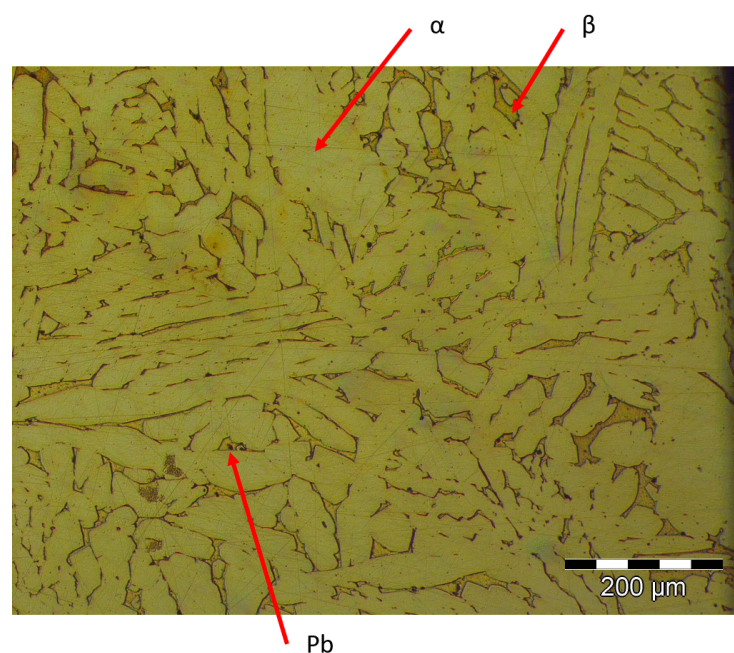


Figura 3.36: Microestrutura da liga Z, secção do meio do provete, ampliação de 150x

3.4.5 Rugosidades

O acabamento superficial é, como visto anteriormente, um parâmetro indicativo da maquinabilidade do material. Por conseguinte, e para além das potências de corte, pressões específicas e dos tipos de apara registados, é também útil estudar o acabamento superficial com variados parâmetros de corte.

O registo de rugosidades foi efetuado em dois pontos distintos na superfície, desfasados entre si de 180° , pelo que apenas a média aritmética é apresentada. De seguida, nas Figuras 3.37 a 3.39, são apresentados os valores das rugosidades obtidas, para todas as condições de ensaio. Adicionalmente, e para além dos valores experimentais, são apresentadas também, para cada liga, as curvas teóricas de R_a e R_{max} de modo a poder analisar o efeito do parâmetro avanço - f_n . Sendo que R_a e R_{max} apenas são função do avanço e do raio da ferramenta, optou-se pela representação de apenas uma curva de R_a e outra de R_{max} , para cada liga.

As rugosidades das ligas L e R são bastante similares entre si, à semelhança dos resultados obtidos na apara. De acordo com a literatura, e para estas duas ligas, os resultados de R_a são verificados para as condições de avanço $f_n = 0.05$ e 0.14 mm/rot [3].

A variação da velocidade (V_c) e da profundidade de corte (a_p) não é capaz de afetar significativamente a qualidade superficial, ao invés do avanço (f_n) que traduz variações significativas, em concordância também com a literatura. A vermelho são expressas as curvas teóricas calculadas, onde é possível verificar alguma discordância com os resultados experimentais. Em todos os casos, os resultados experimentais obtidos são superiores aos valores teóricos, denotando-se contudo a mesma tendência de aumento da rugosidade com o avanço. Este facto é verificado quer para R_a , quer para R_{max} . De acordo com as Figuras 3.37 e 3.38, é possível inferir que nestas ligas a rugosidade é proporcional ao avanço dado [52].

Para estas duas ligas, R_a toma os valores de 0.5 , 1.7 e $4.3 \mu\text{m}$ para os avanços de 0.05 , 0.14 e 0.25 mm/rot, respetivamente; R_z toma os valores de 4 , 7 e $20 \mu\text{m}$ para os avanços de 0.05 , 0.14 e 0.25 mm/rot, respetivamente e, por fim, R_{max} toma os valores de 5 , 7 e $21 \mu\text{m}$ para os avanços de 0.05 , 0.14 e 0.25 mm/rot, respetivamente, aproximadamente.

Os resultados apresentam-se coerentes com o esperado, com R_a a tomar os menores valores e R_z e R_{max} a apresentarem valores mais elevados e com grande aproximação entre si.

Para a liga Z, R_a comporta-se de modo análogo (numericamente semelhante) às outras duas ligas anteriormente vistas. Analogamente às ligas anteriormente analisadas, é comum o facto de a variação da velocidade não ter impacto significativo na qualidade superficial. No caso da profundidade de corte (a_p), esta tem impacto significativo, tal como o avanço, ambos proporcionais à rugosidade superficial. Para esta liga, as expressões teóricas das rugosidades não comprovam totalmente os resultados. As curvas teóricas de R_a e R_{max} para a liga Z estão também abaixo dos valores experimentais obtidos.

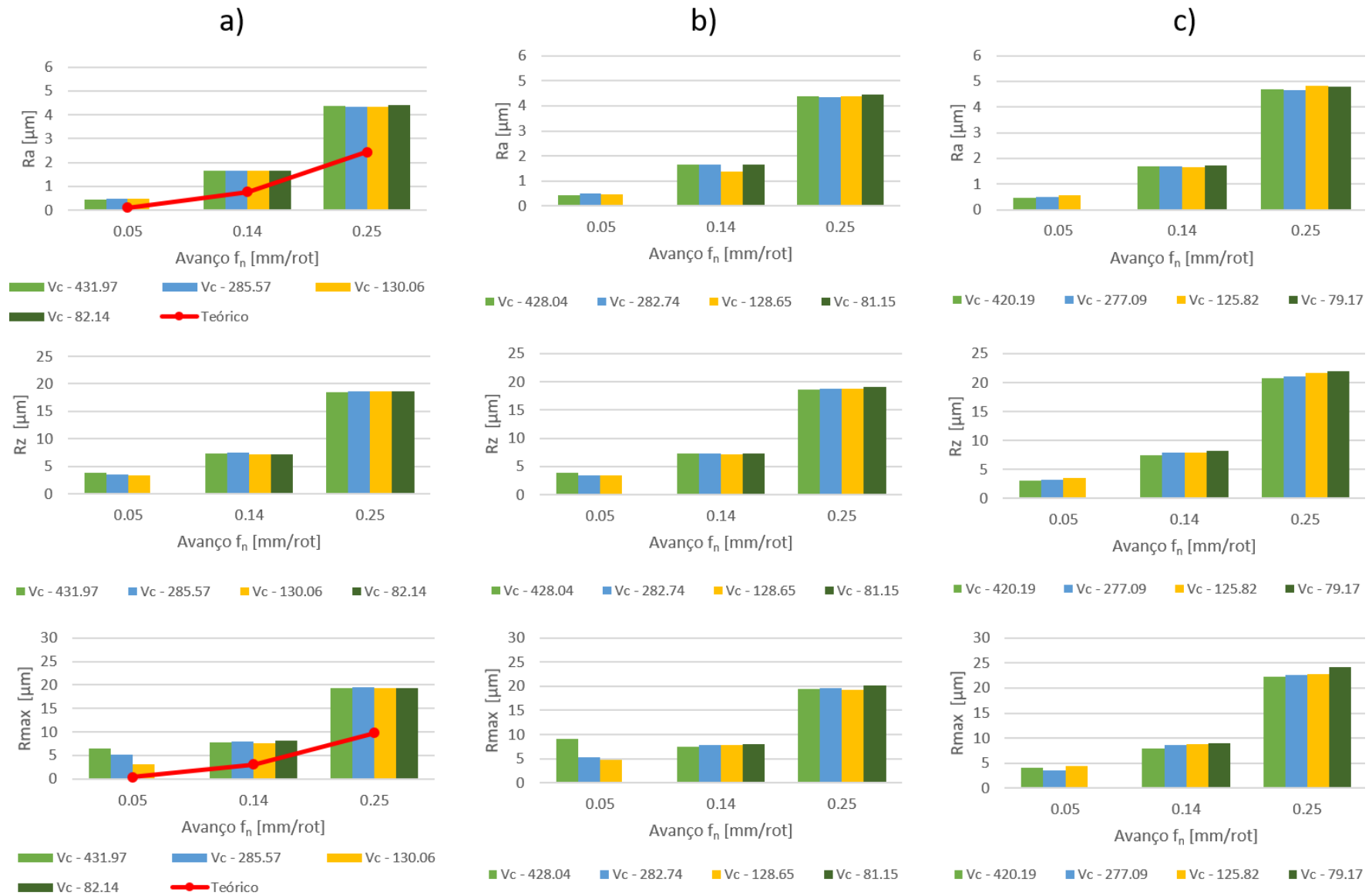


Figura 3.37: Rugosidade da superfície (R_a , R_z e R_{max}) na liga L para condições de a_p igual a 0.25, 0.5 e 1.5 mm para a), b) e c), respectivamente, V_c em m/min

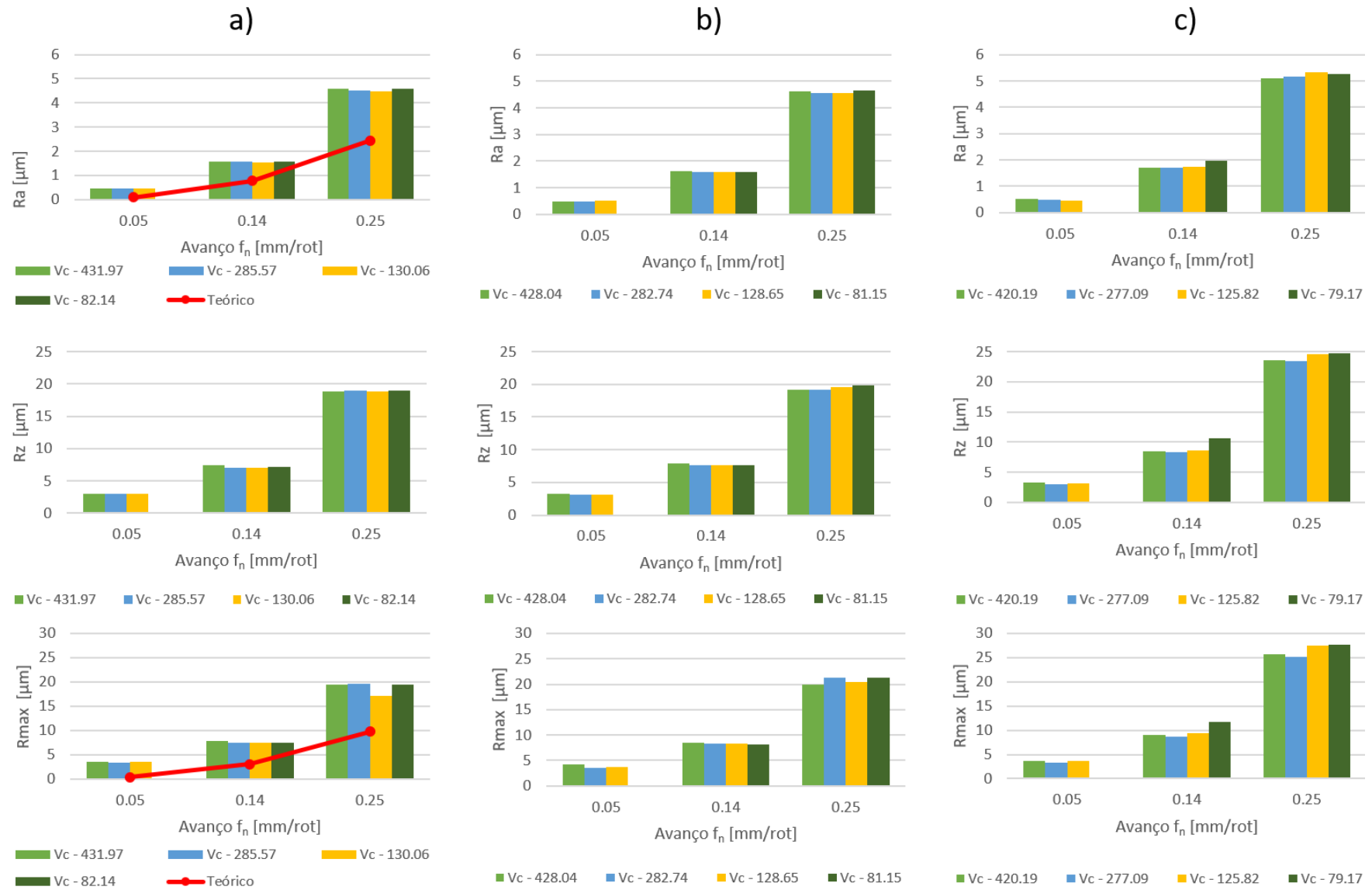


Figura 3.38: Rugosidade da superfície (R_a , R_z e R_{max}) na liga R para condições de a_p igual a 0.25, 0.5 e 1.5 mm para a), b) e c), respectivamente, V_c em m/min

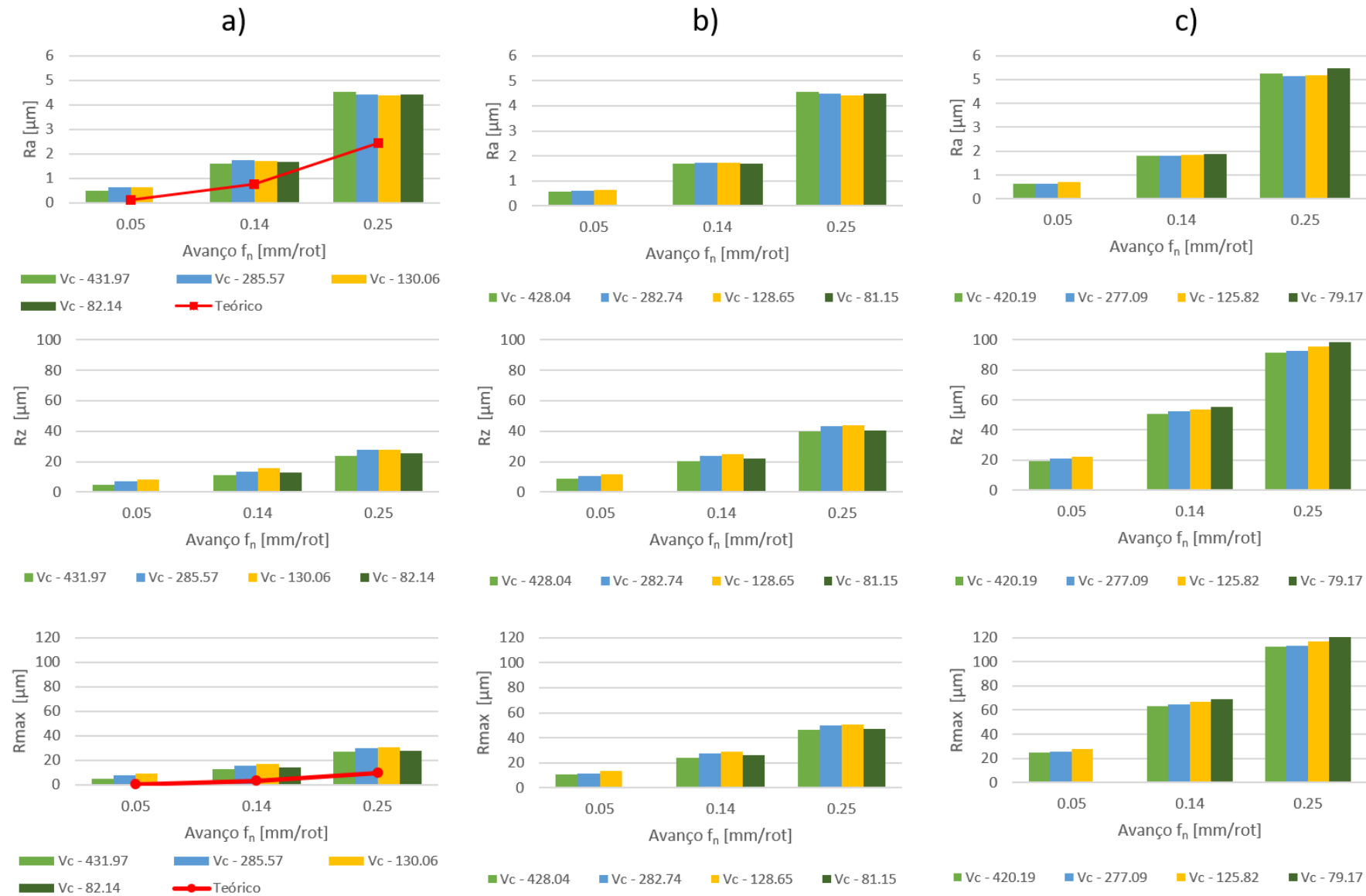


Figura 3.39: Rugosidade da superfície (R_a , R_z e R_{max}) na liga Z para condições de a_p igual a 0.25, 0.5 e 1.5 mm para a), b) e c), respectivamente, V_c em m/min

R_Z toma valores médios de 6, 10 e 20 μm para avanços de 0.05 mm/rot, 13, 21 e 50 μm para avanços de 0.14 mm/rot e 25, 40 e 95 μm para avanços de 0.25 mm/rot. Por sua vez R_{max} toma valores médios de 7, 11 e 22 μm para avanços de 0.05 mm/rot, 15, 25 e 65 μm para avanços de 0.14 mm/rot e 27, 47 e 115 μm para avanços de 0.25 mm/rot.

O desvio médio das rugosidades para cada um dos ensaios realizados não é significativo pelo que se esperaria uma maior aproximação entre as curvas teóricas e reais. Realçando o facto de apenas se terem efetuado duas medições e de a geometria do provete não ser plana, põe-se a hipótese de terem havido alguns erros de medição, bem como a existência de heterogeneidades na estrutura do provete. Estes dois fatores podem ser a causa das divergências notadas. O raio de ponta da ferramenta (r_ϵ) não é considerado como variável, pois a ferramenta utilizada não apresentava quaisquer sinais de desgaste no início dos ensaios, bem como pelo facto de, no final dos ensaios, as condições da pastilha de corte estarem praticamente inalteradas.

Para as ligas L e R, o melhor acabamento superficial é dado pelo menor avanço sendo a velocidade de corte e a profundidade de corte indiferentes, enquanto para a liga Z, as melhores rugosidades superficiais são dadas quer pelo menor avanço, quer pela menor profundidade de corte (V_c irrelevante).

3.5 Análise ANOVA

Até ao momento, todos os resultados foram apresentados de forma gráfica e analisados de um modo mais empírico. Contudo, a análise de resultados pode ser realizada com maior rigor matemático e estatístico, utilizando para tal uma análise de variância, *ANALYSIS of VARIANCE* (ANOVA).

A análise ANOVA é uma ferramenta de decisão, estatisticamente construída para detetar diferenças no desempenho médio de variáveis em resultados. O objetivo desta análise é perceber se, estatisticamente, uma variável tem ou não influência no resultado final. A relevância de cada variável de entrada é determinada a partir do valor de uma distribuição F, também designada por distribuição Fisher-Snedecor, para um determinado nível de confiança, valor P (valor de prova). O valor de F pode ser calculado através da razão entre a média dos quadrados da variável e a média de quadrados do erro:

$$F = \frac{MQ_{fator}}{MQ_{erro}} \quad (3.1)$$

A análise foi efetuada com P a tomar o valor de 0.05, o que corresponde a um intervalo de confiança de 95%. Caso o valor de P calculado seja inferior a 0.05, então a variável diz-se significativa no processo. Caso contrário, a variável é considerada irrelevante para a análise e é rejeitada [64].

Para além desta análise, foi possível calcular e quantificar o valor do efeito de cada variável de entrada no resultado final. Embora a análise ANOVA seja importante para validar estatisticamente conclusões, esta quantificação dos efeitos das variáveis permite uma maior sensibilidade para a otimização dos processos. A contribuição de cada variável, i (%), é dada por:

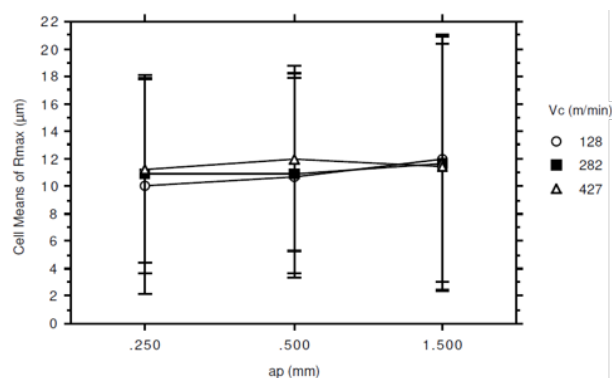
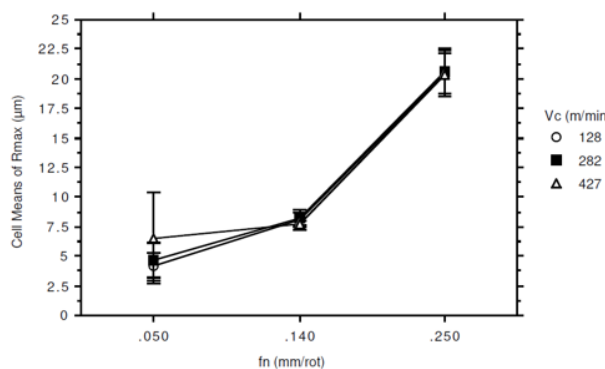
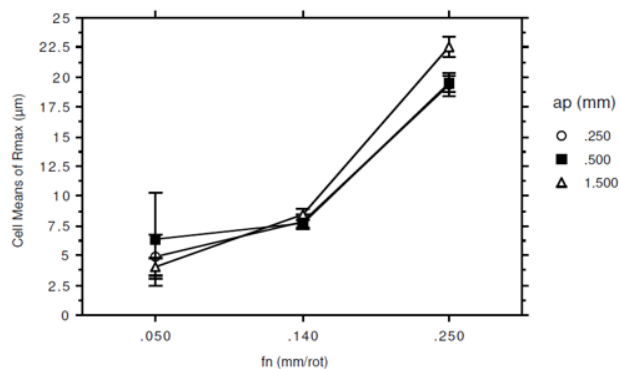
$$Contribuição_i(\%) = \frac{Soma\ de\ quadrados_i - Variância_{erro} * Grau\ de\ liberdade_i}{Soma\ de\ quadrados_{erro}} \quad (3.2)$$

A análise ANOVA foi feita com recurso ao *software* SuperANOVA, para as três ligas, recorrendo às variáveis de entrada e suas interações (V_c , f_n , a_p , $V_c * a_p$, $V_c * f_n$ e $a_p * f_n$) e aos resultados obtidos (F_c , K_s , P_c , R_a , R_{max} e R_z). Neste caso, F_a e F_p não foram analisados pois a sua contribuição para a força de maquinagem total, F_m , não representa metade da contribuição de F_c , razão pela qual apenas se analisou a força de corte. Caso o erro residual calculado seja elevado, é também possível perceber se mais alguma variável deveria ter sido considerada, como por exemplo a temperatura. Cada variável de entrada foi avaliada nos seus diversos níveis, à exceção de V_c ($a_p = 0.25, 0.5$ e 1.5 ; $f_n = 0.05, 0.14$ e 0.25 mm e $V_c = 128, 282$ e 427 m/min). Como os ensaios foram realizados num torno convencional, não foi possível manter a velocidade de corte constante. No entanto, foram adotados 4 valores de frequências de rotação ($n = 2500, 1800, 900$ e 630 rpm) e para cada valor foi calculada a velocidade de corte média, tendo em conta a variação do diâmetro da peça. No entanto, para $n = 630$ rpm, nem todos os avanços foram ensaiados, pelo que a ANOVA foi realizada sem estes resultados. Retirando os ensaios de $n = 630$ rpm, é possível efetuar a análise com as variáveis equilibradas, ou seja, cada variável assume o mesmo número de níveis, neste caso três. A Tabela 3.6 exemplifica uma análise de dados, neste caso para R_{max} na liga L.

Tabela 3.6: Teste ANOVA para a rugosidade máxima R_{max} da liga L

Variável	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Variâncias	Valor F	Valor P	Contribuição %
V_c	2	4.04	2.02	0.98	0.39	0.0
a_p	2	8.86	4.43	2.147	0.132	0.2
f_n	2	2396.27	1198.13	580.67	> 0.0001	93.7
$V_c * a_p$	4	8.23	2.06	0.997	0.42	0.0
$V_c * f_n$	4	15.95	3.99	1.93	0.13	0.3
$a_p * f_n$	4	48.51	12.13	5.88	0.001	1.6
Resíduo	35	72.22	2.06			4.2
Total	53	2554.08				100

Com os dados da tabela, segundo o teste ANOVA, podemos inferir que, para a rugosidade máxima, apenas o avanço e a interação do avanço com a profundidade de corte são significativos para o resultado, com 95% de confiança. Da análise verifica-se que o avanço é praticamente o único fator que contribui para a rugosidade. A pequena quantidade de erro resultante permite comprovar as afirmações anteriores, pois os resultados são conclusivos (pouco resíduo). As Figuras 3.40, 3.41 e 3.42, retiradas da análise, mostram o efeito das interações $V_c * a_p$, $V_c * f_n$ e $a_p * f_n$ em R_{max} , respetivamente. Como é possível observar, nas três figuras, as curvas são muito próximas entre si, o que implica haver pouca contribuição de cada uma das interações em R_{max} , como apresentado na Tabela 3.6.

Figura 3.40: Efeito da interação $V_c * a_p$ em R_{max} Figura 3.41: Efeito da interação $V_c * f_n$ em R_{max} Figura 3.42: Efeito da interação $a_p * f_n$ em R_{max}

As Tabelas 3.7, 3.8 e 3.9 resumem a análise feita para todos os casos ensaiados, evidenciando o valor P e a contribuição de cada variável para o resultado final.

Tabela 3.7: Valor P e contribuição percentual das variáveis, segundo o teste ANOVA, para a liga L

Variável	F_c		K_s		P_c		R_a		R_{max}		R_z	
	P	%	P	%	P	%	P	%	P	%	P	%
V_c	0.0072	0.0	0.0001	3.0	0.0001	17.4	0.9814	0.0	0.3856	0.0	0.8777	0.0
a_p	0.0001	60.6	0.0001	8.4	0.0001	40.5	0.0001	0.2	0.1320	0.2	0.0001	0.4
f_n	0.0001	27.1	0.0001	76.6	0.0001	18.5	0.0001	99.5	0.0001	93.7	0.0001	98.5
$V_c * a_p$	0.0002	0.1	0.0001	6.3	0.0001	8.8	0.0430	0.0	0.4223	0.0	0.3549	0.0
$V_c * f_n$	0.0031	0.1	0.0680	0.4	0.0001	3.7	0.0217	0.0	0.1267	0.3	0.6621	0.0
$a_p * f_n$	0.0001	11.9	0.0013	1.4	0.0001	8.0	0.0001	0.2	0.0010	1.6	0.0001	0.7
Resíduo		0.2		4.0		3.0		0.2		4.3		0.5

Tabela 3.8: Valor P e contribuição percentual das variáveis, segundo o teste ANOVA, para a liga R

Variável	F_c		K_s		P_c		R_a		R_{max}		R_z	
	P	%	P	%	P	%	P	%	P	%	P	%
V_c	0.0684	0.1	0.6674	0.0	0.0001	18.4	0.9156	0.0	0.9737	0.0	0.8734	0.0
a_p	0.0001	58.9	0.0001	13.1	0.0001	38.4	0.0001	0.4	0.0001	2.2	0.0001	1.4
f_n	0.0001	28.6	0.0001	63.7	0.0001	19.6	0.0001	98.6	0.0001	90.8	0.0001	95.0
$V_c * a_p$	0.0789	0.1	0.5069	0.0	0.0001	8.2	0.9227	0.0	0.7328	0.0	0.9872	0.0
$V_c * f_n$	0.0252	0.2	0.6009	0.0	0.0001	4.4	0.9960	0.0	0.9874	0.0	0.9807	0.0
$a_p * f_n$	0.0001	11.0	0.2728	0.6	0.0001	7.5	0.0001	0.5	0.0004	2.4	0.0001	1.4
Resíduo		1.1		22.5		3.5		0.6		4.6		2.2

Tabela 3.9: Valor P e contribuição percentual das variáveis, segundo o teste ANOVA, para a liga Z

Variável	F_c		K_s		P_c		R_a		R_{max}		R_z	
	P	%	P	%	P	%	P	%	P	%	P	%
V_c	0.0002	0.1	0.0001	17.5	0.0001	13.8	0.9221	0.0	0.9692	0.0	0.9543	0.0
a_p	0.0001	55.7	0.0001	12.2	0.0001	39.8	0.0001	0.7	0.0049	16.9	0.0053	16.2
f_n	0.0001	29.1	0.0001	36.3	0.0001	21.1	0.0001	98.4	0.0101	13.8	0.0054	16.1
$V_c * a_p$	0.3754	0.0	0.0001	13.1	0.0001	7.7	0.5615	0.0	1.0000	0.0	1.0000	0.0
$V_c * f_n$	0.8396	0.0	0.2119	0.8	0.0001	3.6	0.0052	0.0	1.0000	0.0	1.0000	0.0
$a_p * f_n$	0.0001	15.0	0.4328	0.0	0.0001	10.5	0.0001	0.7	0.4865	0.0	0.4857	0.0
Resíduo		0.2		20.1		3.4		0.2		69.2		67.7

Para F_c , no caso das três ligas, a_p e f_n são os fatores que mais contribuem, por esta ordem de importância, em concordância com o verificado anteriormente. A velocidade de corte não tem praticamente influência na força de corte, na gama testada. A restante contribuição para F_c é dada pela interação $a_p * f_n$ que, a par de um erro muito residual ($\sim 1\%$), completa os 100 % de contribuições.

No que respeita à pressão específica de corte, K_s , foram analisados até agora os efeitos de a_n e f_n em separado, pelo que agora é possível verificar o efeito conjugado, que traduz a área de secção (S). De facto, a área de secção é pouco relevante para a pressão específica de corte, bem como a velocidade de corte para as ligas L e R. No caso da liga Z, V_c assume já um efeito significativo com uma contribuição de 17.5%. No geral, é a profundidade de corte e o avanço que mais contribuem para a pressão específica de corte. Apesar desta análise feita para as três ligas, no caso das ligas R e Z o erro é relevante. Cerca de 20% deve-se a erros pelo que as análises não são tão conclusivas, existindo ainda bastantes variações por explicar.

Quanto às potências de corte, estas revelam dependência de todas as variáveis, com maior incidência em a_p , f_n e V_c , pela ordem apresentada. Fisicamente, este resultado é bastante coerente, dado que a variação de qualquer uma das entradas irá afetar diretamente a energia necessária para o processo.

Nas rugosidades (R_a , R_{max} e R_z), para as ligas L e R, o fator f_n é praticamente o único fator responsável, tendo uma contribuição geral de mais de 95%. Para a liga Z, o efeito de f_n em R_a é idêntico, sendo que para R_{max} e R_z , os resultados são pouco conclusivos, e o erro apresenta um peso de cerca de 70%.

O resíduo ou erro indica a parte dos resultados que não conseguiram ser explicados, devido a erros de medição, variações de temperatura, vibrações ou outros efeitos aleatórios e/ou outras variáveis que não foram tidas em conta no processo e deveriam ter sido. Os resultados são, no geral, bastante satisfatórios e conclusivos pois apresentam um resíduo bastante baixo, indicando que todas as variáveis do processo foram tidas em conta.

Capítulo 4

Impacto da Aplicação de Ferramentas de Corte Revestidas em Processo Produtivo

A utilização de revestimentos em ferramentas de corte tem vindo a ser implementada nas últimas décadas, com o objetivo de conferir uma maior durabilidade às ferramentas, permitindo com isso, uma redução de custos ou aumento da produtividade, bem como uma melhoria da superfície maquinada. Aumentos no tempo de vida da ferramenta podem traduzir-se em menores custos por peça, menor tempo de paragem para substituição de ferramentas desgastadas, e ainda, uma qualidade superficial superior das peças.

Um dos maiores gastos económicos que a secção de maquinagem da GROHE apresenta é, pois, relacionada com as ferramentas de corte. Este capítulo apresenta um exercício de implementação de diferentes revestimentos e a análise do desempenho dos mesmos em produção. Procura-se fazer uma análise comparativa entre os esforços de corte de uma ferramenta normal e ferramentas revestidas. Esta análise é realizada apenas com base numa única geometria de ferramenta, utilizada para furação. Apesar desta análise ter esta condicionante, os resultados podem ser, na sua grande maioria, extrapolados para todo o processo produtivo.

4.1 Ferramentas

Como referido anteriormente, na GROHE são utilizadas ferramentas únicas, capazes de reproduzirem perfis singulares, para diferentes produtos. Por conseguinte, são utilizadas diversas ferramentas personalizadas, para além de uma reduzida quantidade de ferramentas *standard*. Sempre que possível, para um correto trabalho e maior tempo de vida das ferramentas, estas são dotadas de canais internos de refrigeração. A maioria das ferramentas utilizadas na empresa necessita de um suporte para fixar na árvore da máquina, pelo que as ferramentas não são produzidas com um só corpo, por duas razões:

- Preço: a construção da ferramenta num só corpo, com o suporte incorporado, obriga a ferramenta a ter mais material e um processo de fabrico mais complexo. Contudo, a utilização de um corpo, com o suporte incorporado, permitiria um melhor desempenho da ferramenta, pois reduziria as vibrações e aumentaria a precisão;
- Stocks: tendo ferramentas amovíveis, é possível uma maior versatilidade, permitindo que os suportes sejam utilizados com quase todos os tipos de ferramentas existentes.

O tempo de vida das ferramentas nem sempre é fácil de controlar, pelo que o seu fim de vida é muitas vezes ditado através da verificação de peças defeituosas na produção. Com o tipo de maquinagem que a empresa executa, as ferramentas desgastadas (no final de vida) apresentam essencialmente aresta postiça, deformação plástica/amaciamento do gume (Figura 4.1), craterização (Figura 4.2) e por vezes entalhes e/ou fraturas. Para prolongar a vida da ferramenta e adiar a ocorrência desses fenómenos, estuda-se de seguida a aplicação de alguns revestimentos, numa ferramenta de referência.

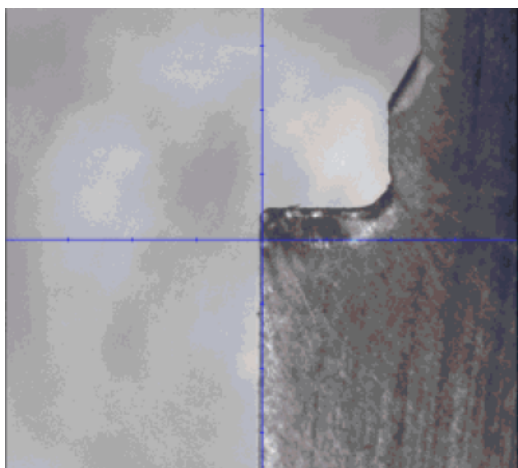


Figura 4.1: Ferramenta de corte com amaciamento no gume

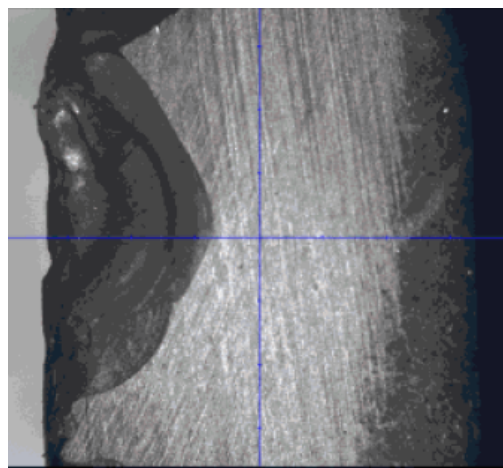


Figura 4.2: Ferramenta de corte com craterização na face de ataque

4.1.1 Revestimentos

O latão dito normal é um material relativamente simples de maquinar. Contudo, a remoção de Pb destas ligas dificulta bastante o processo de maquinagem pois aumenta os esforços de maquinagem e o controlo da apara é mais complexo, como se pôde observar no capítulo anterior. A produção em massa conduz a um grande desgaste das ferramentas, mesmo com ligas de latão ditas normais e fáceis de maquinar. No sentido de maximizar o tempo de vida das ferramentas, surgiram os revestimentos em ferramentas de corte que, embora muito comuns em oferta de ferramentas *standard*, são menos comuns no fabrico de ferramentas customizadas. Como a sua aplicação tem um impacto importante no custo da ferramenta, a decisão da sua aplicação requer a realização de estudos sobre o custo-benefício da solução.

4.2 Procedimento Experimental

Para testar alguns revestimentos na maquinaria de ligas de latão, foram observadas ferramentas em produção e foi avaliado o seu desempenho ao longo do tempo. Estes ensaios experimentais decorreram sempre em paralelo com a atividade fabril da empresa, pelo que algumas condições foram impostas para a sua realização:

- Ferramenta - procurou-se estudar uma só ferramenta, com uma alta taxa de desgaste, para que a extração dos resultados fosse célere e permitisse a realização do trabalho no horizonte temporal disponível;
- Material - a liga de latão trabalhada foi sempre a mesma e corresponde à liga L, analisada no capítulo anterior;
- Produção - como a atividade fabril é ininterrupta, assim também é a utilização das máquinas. Foram utilizadas diversas ferramentas em paralelo, mas sempre no mesmo equipamento, ou seja, enquanto umas ferramentas se encontravam em produção, outras eram sujeitas a observação ou testes complementares;
- Condições - a repetibilidade dos ensaios foi uma preocupação, pelo que se procurou manter constantes as fontes de perturbação ao longo da campanha experimental. Para tal, todos os equipamentos utilizados foram constantes, bem como os procedimentos de manuseamento.

A ferramenta selecionada executa um perfil de furação, pelo que a monitorização e estrutura dos ensaios de furação é definida da seguinte forma:

- Escolha dos revestimentos;
- Preparação das peças;
- Ensaios de furação;

4.2.1 Revestimentos Utilizados

De modo a diminuir os fenómenos de desgaste nas ferramentas, foram estudados diversos revestimentos, de entre os quais foram utilizados dois diferentes. Apenas dois revestimentos foram utilizados devido ao trinómio espaço temporal vs produção fabril vs número de ferramentas na empresa. Devido às condicionantes existentes e ao trinómio referido, foram selecionadas no total apenas cinco ferramentas, duas com um revestimento, outras duas com outro e apenas uma sem revestimento.

A escolha propriamente dita dos revestimentos teve algumas condicionantes, pelo que apenas alguns revestimentos puderam ser escolhidos. De entre os inúmeros revestimentos existentes e atendendo ao fornecedor de ferramentas, apenas houve a hipótese de estudar os seguintes revestimentos, com as seguintes características:

Tabela 4.1: Propriedades dos revestimentos BALINIT® do Fabricante Oerlikon [38]

Revestimento	Material	Espessura μm	Micro dureza HV 0.05	Coef. atrito	Temp. máx trabalho $^{\circ}\text{C}$	Estrutura Camada
A	TiN	2 a 6	2300	0.4	600	Mono
B	TiCN	2 a 6	3000	0.4	400	Mono
FUTURA NANO	TiAlN	3 a 7	3300	0.3-0.35	900	Nano
FUTURA TOP	TiAlN	3 a 7	3300	0.25	900	Nano
ALCRONA PRO	AlCrN	3 a 7	3200	0.35	1100	Mono
ALCRONA TOP	AlCrN	3 a 7	3200	0.3	1100	Mono
HELICA	base AlCrN	3 a 7	3000	0.25	1100	Multi
LATUMA	AlTiN	3 a 7	3000	0.35	1000	Mono

De entre os revestimentos disponíveis, foram selecionados dois, os revestimentos *ALCRONA PRO* e *LATUMA*.

O revestimento AlCrN é tipicamente usado com vista a melhorar o desempenho de ferramentas que maquinem ligas cuja base seja o cobre, ou outros materiais do grupo ISO N (materiais não ferrosos), que é o caso do latão. Sendo este o tipo de material maquinado na empresa, optou-se em primeiro lugar por esta solução [33]. Embora o pretendido fosse o *ALCRONA TOP*, por razões de logística, a ferramenta foi revestida com *ALCRONA PRO*.

O revestimento AlTiN foi selecionado em segundo lugar pelas suas boas propriedades de dureza e elevada temperatura de trabalho. Para além deste tipo de revestimento ser utilizado na maquinagem que envolva altas temperaturas e para além de não ter sido possível medir a temperatura do processo de maquinagem na empresa, este revestimento foi utilizado para perceber se a temperatura teria ou não um impacto significativo no desgaste da ferramenta. Ou seja, a deformação plástica do gume e consequente amaciamento da aresta de corte, devido a temperaturas excessivas, foi também um fator que se procurou estudar e compreender melhor.

Ambos os revestimentos foram aplicados a uma temperatura de 480°C , pela técnica de PVD, segundo o fornecedor OERLIKON. De realçar a importância da técnica de aplicação PVD, pois tendo em conta o processo produtivo na GROHE, velocidades de corte moderadas/elevadas ($V_c \simeq 100$ a 200 m/min) e avanços relativamente baixos ($f_n = 0.05$ a 0.15 mm/rot), é a técnica adequada. Os custos associados aos revestimentos, dados na Tabela 4.2, são em unidades monetárias e tomam como base de referência o preço de uma unidade nova, a que equivale 100 u.m..

Tabela 4.2: Comparação de custos entre a ferramenta base e os diversos revestimentos

Ferramenta	Preço [u.m.]
Ferramenta nova	100
Ferramenta reparada	78
Revestimento AlCrN	26.5
Revestimento AlTiN	30

Outros tipos de revestimentos seriam interessantes de estudar tais como o CrN, o ZrN, o NbC

ou mesmo o TaC. O óxido de Alumínio (Al_2O_3) e o diamante (PCD) não poderiam ser opção, pois embora o binómio investimento/durabilidade compense a sua utilização, a ferramenta em questão pode trabalhar em contacto com areias.

4.2.2 Preparação das Peças

As peças são referentes a um componente de um chuveiro (ver Figura 4.3 e Anexo B.1), feito na GROHE, na anteriormente designada liga L. A sua obtenção foi efetuada na produção, num total de 15 amostras, após a qual, foi necessário limar algumas arestas, que continham ainda latão nos bordos.



Figura 4.3: Produto final - chuveiro [1]

A furação feita pela ferramenta (Figura 4.4) utilizada nos ensaios, é a segunda operação a ser efetuada na peça (Figura 4.5). Como tal, a obtenção da peça foi feita já com a primeira operação executada (fresagem de uma face), para equiparar ao máximo as condições de trabalho na empresa.

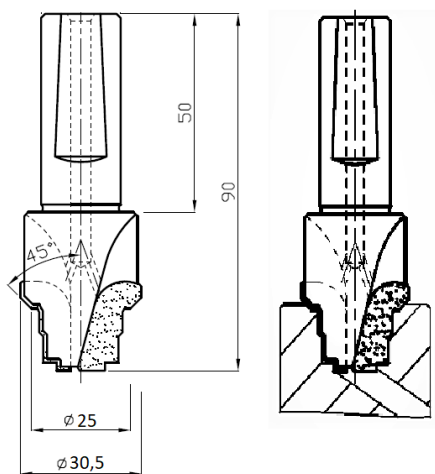


Figura 4.4: Ferramenta utilizada para os ensaios de furação

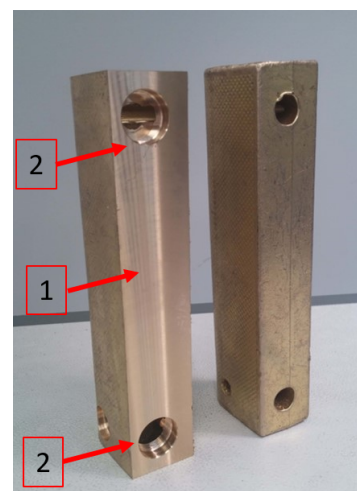


Figura 4.5: Chuveiro com e sem as duas primeiras operações de maquinagem; 1) fresagem de face, 2) furação

4.2.3 Ensaios de Furação

Os ensaios de furação consistem na furação de várias peças (iguais entre si), recorrendo a ferramentas com e sem revestimentos, cinco no total. Destas cinco ferramentas, duas têm o revestimento Alcrona (AlCrN), duas o revestimento Latuma (AlTiN) e uma não tem qualquer revestimento. Por razões de *stock* imobilizado na empresa e de tempo para ensaios, apenas foi utilizada uma ferramenta sem revestimento para esta análise, contrariamente às duas pretendidas. Nestes ensaios estudar-se-ão os esforços de corte (F_a , F_p , F_c) e o binário resistente (M_z), bem como o desgaste progressivo das ferramentas. Estes ensaios são realizados periodicamente, sendo a ferramenta extraída da produção para a realização destes testes e posteriormente recolocada em produção. Estes ensaios permitirão também a aplicação de conhecimentos e confirmação de resultados referentes ao capítulo anterior.

Sabendo que, o tempo de vida da ferramenta sem revestimento ronda as 17500 unidades, os ensaios de furação efetuaram-se na produção da peça número 1, da peça número 4000 e ainda com um terceiro nível de produção, que variou de ferramenta para ferramenta. Para as ferramentas sem revestimento, AlTiN e AlCrN, os níveis de produção com que a última furação foi efetuada foram de 4400, 7280 e 8280 peças, respetivamente. Apenas foram realizados ensaios com estes níveis de produção e de desgaste das ferramentas, visto que não seriam exequíveis análises adicionais no período de tempo disponível para a realização desta dissertação.

4.2.3.1 Ferramenta de corte e suporte

Na furação, a escolha da ferramenta e do seu suporte é fundamental para que se tenha uma boa execução, incluindo repetibilidade. A ferramenta utilizada nos ensaios foi a mesma utilizada na empresa (Figura 4.4). A ferramenta é composta por um corpo de aço e dois insertos de *HM* brasados, cujo metal duro apresenta propriedades entre o grupo K10 e K40. Da geometria, apenas é conhecido o ângulo de saída, α , de 6° , enquanto que, todos os outros são construídos de modo a que a ferramenta execute a furação sem qualquer interferência com a peça. O suporte utilizado, do tipo AD, segundo a norma DIN 69871, foi escolhido tendo em conta a máquina utilizada e a ferramenta. As ferramentas com os revestimentos AlCrN e AlTiN serão doravante designadas por AlCrN1, AlCrN2 e AlTiN1, AlTiN2, respetivamente.

4.2.3.2 Peças

Após a obtenção das peças, foi necessário prepará-las para os ensaios de furação, preparação essa que envolveu um correto posicionamento da peça para a furação. O posicionamento foi feito recorrendo a um dispositivo de fixação, acoplado à célula de carga (Anexo B.2), bem como através de um nivelador e de um esquadro universal, com nível (Figura 4.6), para o posicionamento horizontal da superfície a ser maquinada. De realçar que o mordente de fixação à célula de carga foi fabricado especificamente para estes ensaios, onde as peças são imobilizadas axialmente, através de parafusos.

4.2.3.3 Fresadora CNC

Os ensaios de maquinagem foram efetuados nas oficinas do DEMec, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, com recurso a vários equipamentos e dispositivos.

A medição dos esforços de corte requer preferencialmente máquinas capazes de executar um trabalho simples, rápido e repetitivo. Para tal, foi utilizada uma fresadora CNC de 3 eixos disponível nas oficinas do DEMec (Figura 4.7). Esta fresadora tem uma potência de 7.5 kW e uma frequência de rotação máxima de 6000 rpm, suficientes para os ensaios efetuados.

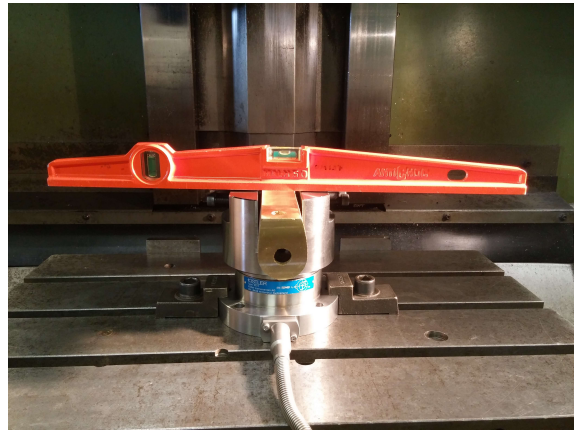


Figura 4.6: Posicionamento das peças para ensaios de furação



Figura 4.7: Fresadora CNC OKUMA MC-40VA utilizada nos ensaios de furação

4.2.3.4 Programa CNC

De modo a replicar todas as condições de fabrico do produto utilizadas na empresa, mantiveram-se todos os parâmetros de corte nos ensaios instrumentados, com exceção do fluido de corte que não foi utilizado nestes ensaios. Assim, com vista à realização dos ensaios, foi feito um programa CNC (Anexo B) capaz de replicar todo o processo de maquinagem feito na GROHE, com os mesmos parâmetros de corte utilizados na empresa.

A profundidade do perfil de furação é de 15.7 ± 0.2 mm, sendo que a velocidade de avanço da ferramenta (V_f) não é constante, ou seja, é escalonada. V_f toma o valor de 600 mm/min ($f_n = 0.24$ mm/rot) até à profundidade de 14.7 mm e, para o último milímetro de furação, de 150 mm/min ($f_n = 0.06$ mm/rot). Este degrau de velocidades é necessário para uma melhor definição do perfil e um melhor escoamento da aparagem gerada no degrau anterior, onde todo o processo é feito com a frequência de rotação constante e igual a 2500 rpm. Para esta frequência de rotação da ferramenta resulta uma velocidade de corte na periferia da ferramenta de 240 m/min (para um diâmetro de

30.5 mm). Note-se que estes valores de velocidades de corte e avanços estão de acordo com os valores testados nos ensaios de maquinabilidade das ligas de latão.

4.2.3.5 Sistema de medição de esforços de maquinagem

Qualquer processo de maquinagem envolve o contacto de uma ferramenta e do material base, originando forças de contacto, neste caso de corte, responsáveis pelo arranque da apara e consequente maquinagem do perfil desejado. Nos ensaios de furação, para além das tradicionais forças segundas os três eixos, o binário (M_z) necessário para imprimir a rotação da ferramenta é também importante. A aquisição dos dados das forças de corte e do binário requer equipamentos especializados, nomeadamente de um dinamómetro piezoelétrico, de um sistema de amplificação desses sinais e um sistema de aquisição de dados. Para a medição dos esforços de corte (F_a , F_p e F_c) e do binário resistente (M_z) durante a furação foi utilizada uma célula de carga (Figura 4.8), composta por um dinamómetro piezoelétrico *KISTLER 9272* e um sistema de fixação, (Figura B.2). Todo o procedimento e mecanismo de medição de esforços é semelhante ao utilizado nos ensaios de torneamento, para além de que nestes ensaios é medido o binário e, com isso, utilizado um quarto canal distinto para aquisição de dados.

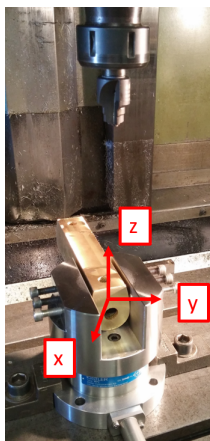


Figura 4.8: Célula de carga utilizada nos ensaios de furação

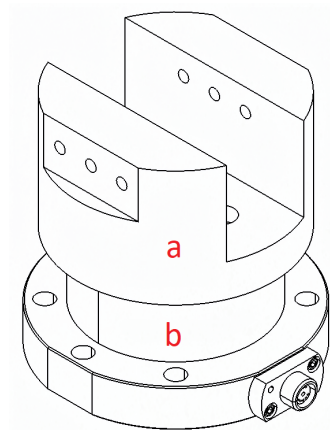


Figura 4.9: a - sistema de fixação (mordente); b - dinamómetro piezoelétrico *KISTLER 9272* (adaptado de [61])

4.2.3.6 Ensaios de furação

O objetivo destes ensaios é então verificar o comportamento de diferentes revestimentos nas ferramentas de corte, de modo a verificar se esta solução é ou não viável para o processo. Para além do comportamento que foi observado e registado no momento dos ensaios, é necessário perceber também se a aplicação dos revestimentos se traduziu numa maior quantidade de peças produzidas ou não (viabilidade económica).

Analogamente aos ensaios de torneamento, a utilização de fluidos de corte não foi feita de modo a simplificar o processo e os resultados.

A medição de rugosidade nos furos não foi efetuada no decorrer dos ensaios, dado que o comprimento mínimo necessário a uma boa medição é maior do que o disponível no perfil do furo. Considerando que o furo é escalonado (Figura 4.4), o comprimento máximo de medição seria de apenas 12 mm na superfície maquinada. Para além do comprimento disponível ser insuficiente, com o rugosímetro disponível, a geometria circular dada pelo reduzido diâmetro, fez com que não fosse possível garantir um correto posicionamento do rugosímetro e consequente medição.

4.3 Análise e Discussão de Resultados

4.3.1 Furação

Os esforços de corte neste tipo de ensaios permitem uma análise das solicitações às quais as ferramentas estão sujeitas, nesta operação em específico.

Consoante a superfície utilizada, revestida ou não, os esforços de corte são diferentes, pelo que foi necessário adotar um procedimento para o tratamento de dados distinto do usado no capítulo anterior. Entre muitas diferenças existentes relativas ao capítulo anterior, está o facto de o processo de maquinagem ser distinto, pelo que o tratamento não pôde ser análogo. A furação do perfil desejado começa a induzir carga na ferramenta a partir do momento em que surge um binário resistente. Após o aparecimento desse binário resistente, é possível inferir que o processo de maquinagem teve início. Considera-se então o intervalo de dados referente ao momento em que o binário resistente se inicia, até ao momento em que volta a ser nulo, como ilustrado na Figura 4.10.

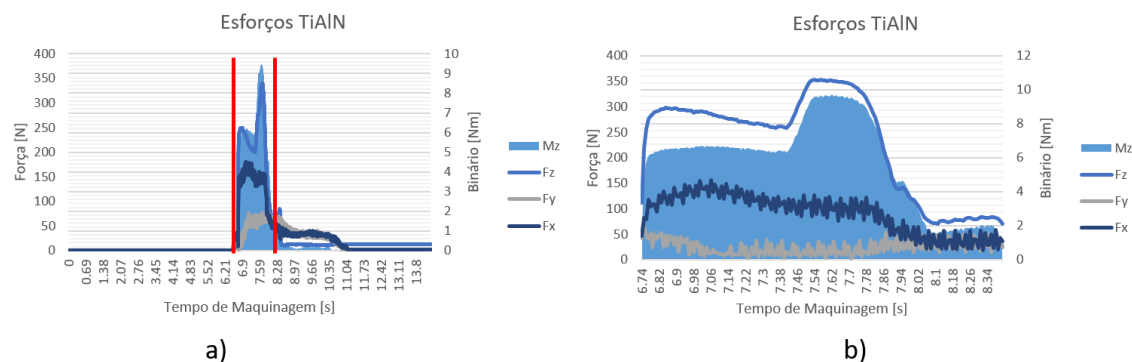


Figura 4.10: Metodologia para tratamento de dados dos ensaios de furação: a) ensaios não tratados e b) ensaios tratados ($n = 2500$ rot/min; $V_f = 600$ mm/rot, $l_{inicial} = 16$ mm e $V_f = 100$ mm/rot, $l_{final} = 1$ mm)

A Figura 4.10 exemplifica, para um dos ensaios, a diferença entre os dados adquiridos pela célula de carga e os dados tratados, que serão utilizados posteriormente para análise.

Naquela que é a segunda operação de maquinagem da peça do chuveiro, é de salientar que os perfis gerados são ligeiramente diferentes entre si, fazendo com que, para cada furo, as curvas de esforços sejam também diferentes consoante o furo. A Figura 4.11 ilustra os dois perfis diferentes gerados, nos quais é possível ver um furo com menor quantidade de material na base, (c) e outro

com maior, (d), doravante designados por furo maior e furo menor, respetivamente. Também importa referir que a pré-furação existente resultante da fundição admite tolerâncias elevadas que resultam em variabilidade na quantidade de material a remover e, consequentemente, nos esforços.



Figura 4.11: Pormenor do furo sem e com a segunda operação efetuada, a) b) e c) d), respetivamente

Durante os ensaios, foram registados os vários esforços de corte (F_x , F_y e F_z) e o binário resistente (M_z), de acordo com o sistema de eixos representado na Figura 4.8, para os dois perfis de furos. F_z representa a força de avanço na direção do eixo z e F_x e F_y as forças no plano na direção dos eixos x e y , respetivamente. Dado que o esforço de corte na direção do avanço (F_z) surge como o mais intenso, deu-se prioridade à sua análise, pelo que a representação dos outros esforços, força no sentido de corte (composição de F_x e F_y) e binário de corte, é realizada no Anexo B. Dado que as forças de corte são o elemento mais importante e significativo destes ensaios, deu-se prioridade à sua análise e representação, sendo os restantes dados (F_x , F_y e M_z) apresentados em anexo (ver Anexo B).

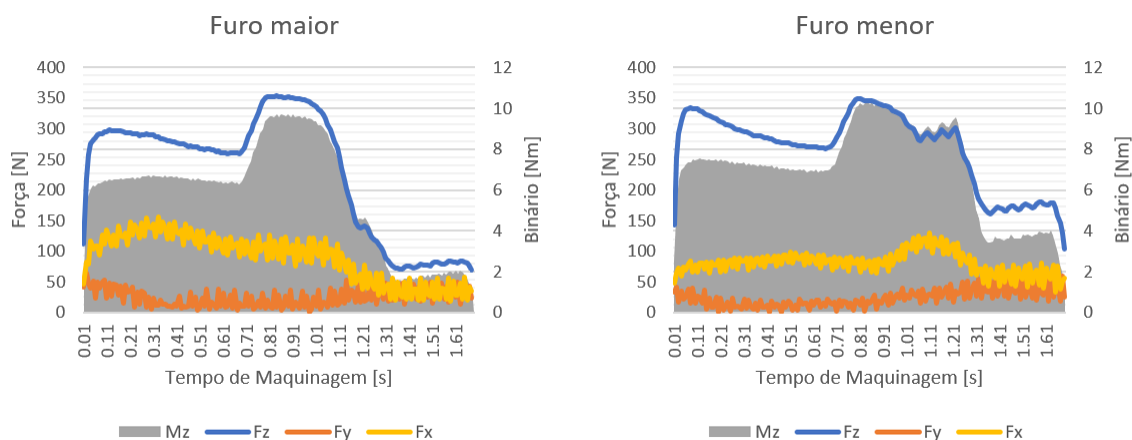


Figura 4.12: Esforços e binários de corte dos ensaios de furação nos dois furos, com o revestimento Latuma (1ª peça); $n = 2500$ rpm, $V_f = 600$ mm/rot

A diferença entre os perfis é notória, quer com curvas distintas, quer com a força de corte no final a apresentar maior valor, no caso do furo menor. Esta diferença advém da necessidade de remoção de uma maior quantidade de material. Apesar de se considerar F_x e F_y relativamente pequenos, quando comparados com F_z , estes assumem uma contribuição relevante na força de maquinagem. Grande parte desta contribuição deve-se, entre outros fatores, à rugosidade do perfil interno, gravado pelo processo de fundição.

A Figura 4.13 ilustra as forças de corte registadas nos ensaios, bem como a sua evolução ao longo do nível de produção das ferramentas. Para cada revestimento, os valores apresentados representam a média das duas ferramentas analisadas.

Para todos os casos, na furação das primeiras peças, os esforços de corte são bastante inferiores aos esforços registados ao longo da produção. Tal efeito prende-se com o estado das arestas de corte, novas e afiadas, pelo que o corte é relativamente simples e acarreta pouco esforço para a ferramenta. No entanto, os esforços de corte sofrem um crescimento acentuado nos primeiros cortes, por motivos relacionados com uma aceleração do desgaste inicial, após o qual se dá uma estabilização da taxa de desgaste com uma evolução pequena dos esforços. O nível de esforço exercido pelas ferramentas com a evolução da produção tem um baixo crescimento entre os dois níveis monitorizados. Não se exclui porém um crescimento acentuado e até mesmo exponencial de F_z com o aumento da produção. Analisando os revestimentos monitorizados, quando comparados com a situação sem revestimento, quer o AlTiN, quer o AlCrN apresentam valores mais elevados de F_z . Este facto pode ser explicado e entendido como uma camada superficial mais dura e resistente que pode reduzir a afiação da aresta de corte representando um agravamento nos esforços de corte. Apesar dos esforços de corte serem superiores, é a camada de revestimento que suporta esse esforço suplementar, protegendo o substrato da ferramenta do desgaste. Após essa camada ser sucessivamente desgastada com a produção, a ferramenta começa então a sofrer desgaste no seu próprio substrato.

Um efeito da produção pode também ser verificado em quase todas as curvas de esforços após o último ensaio efetuado, onde os resultados de F_z começam a surgir com alguma trepidação e instabilidade, sinal de possível início da fase de aceleração do desgaste final.



Figura 4.13: Forças de avanço (F_z) das ferramentas, para o furo maior e para o furo menor, a) e b), respectivamente, com diferentes níveis de produção

A diferença entre as forças de corte nos furos maiores e menores é também bastante significativa quando chegam a atingir-se diferenças na ordem dos 100 N, para a ferramenta sem revestimento, e dos 200 N, no caso das revestidas. Enquanto os revestimentos AlTiN e AlCrN apresentam valores máximos no furo maior de 800 N, no furo menor os valores atingem os 1100 N.

Associado aos esforços de corte das ferramentas está o desgaste induzido pelos mesmos. Para além dos esforços registados, a análise das arestas e do seu desgaste foi também monitorizada ao longo da produção. A zona de maior problemática nestas ferramentas é o topo da ferramenta, parte que tem maior contacto e esforço na furação. De acordo com o desgaste da ferramenta, definiram-se então 3 zonas diferentes, representadas na Figura 4.14. Na figura as arestas de corte estão divididas por cores, consoante o seu nível de desgaste, partindo do vermelho (zona com maior desgaste) até ao verde, zona com pouco desgaste.

A Figura 4.15 ilustra o estado da ferramenta após uma peça produzida (2 furos maquinados) das ferramentas com revestimento e sem revestimento. A superfície visual das ferramentas com o revestimento AlTiN e AlCrN é igual, pelo que optou-se apenas por representar uma delas. Aqui é possível verificar as superfícies e arestas de corte bem definidas, em concordância com os esforços registados, que, no caso da ferramenta sem revestimento, apresenta uma superfície bastante irregular.

Após 4000 peças produzidas, o desgaste das ferramentas foi de novo controlado, apresentando-se na Figura 4.16 os resultados. À semelhança da figura anterior, as ferramentas com revestimento apresentavam desgaste e superfícies semelhantes, pelo que se optou por uma representação apenas. As superfícies, neste caso, denotam já algum desgaste na aresta de corte de topo onde um arredondamento começa a ser perceptível. Até este nível de produção, não existem diferenças relevantes entre o desgaste de ferramentas revestidas e o desgaste da ferramenta sem revestimento.

A Figura 4.17 ilustra o estado de desgaste das ferramentas após o último nível de produção monitorizadi, onde os efeitos da produção são bastante notórios. Com o revestimento AlTiN, o metal duro, substrato da ferramenta apresenta já sinais de fissuração no topo da ferramenta, que posteriormente levarão à fratura. Uma das arestas inferiores apresenta também sinais de desgaste, onde é possível verificar uma coloração diferente do substrato, tratando-se, à partida, de amaciamento do gume de corte. Apesar da ferramenta conseguir ainda perfilar o diâmetro mais apertado, o desgaste na aresta de topo ronda os 300 μm , pelo que se aconselha a sua substituição (e reperfilamento). Com o revestimento AlCrN, o desgaste é análogo ao anterior, devendo proceder-se de igual forma à sua substituição. Constata-se que as ferramentas revestidas apresentam níveis de

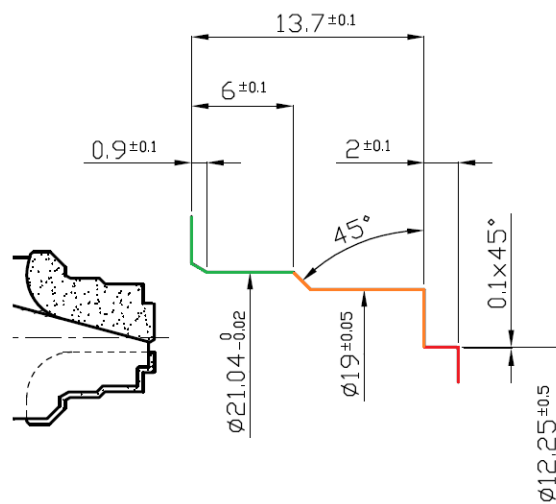


Figura 4.14: Divisão das arestas de corte na ferramenta consoante o seu nível de desgaste

desgaste mais acentuado que a ferramenta não revestida, o que é coerente com os esforços de corte mais acentuados registados nos ensaios instrumentados.

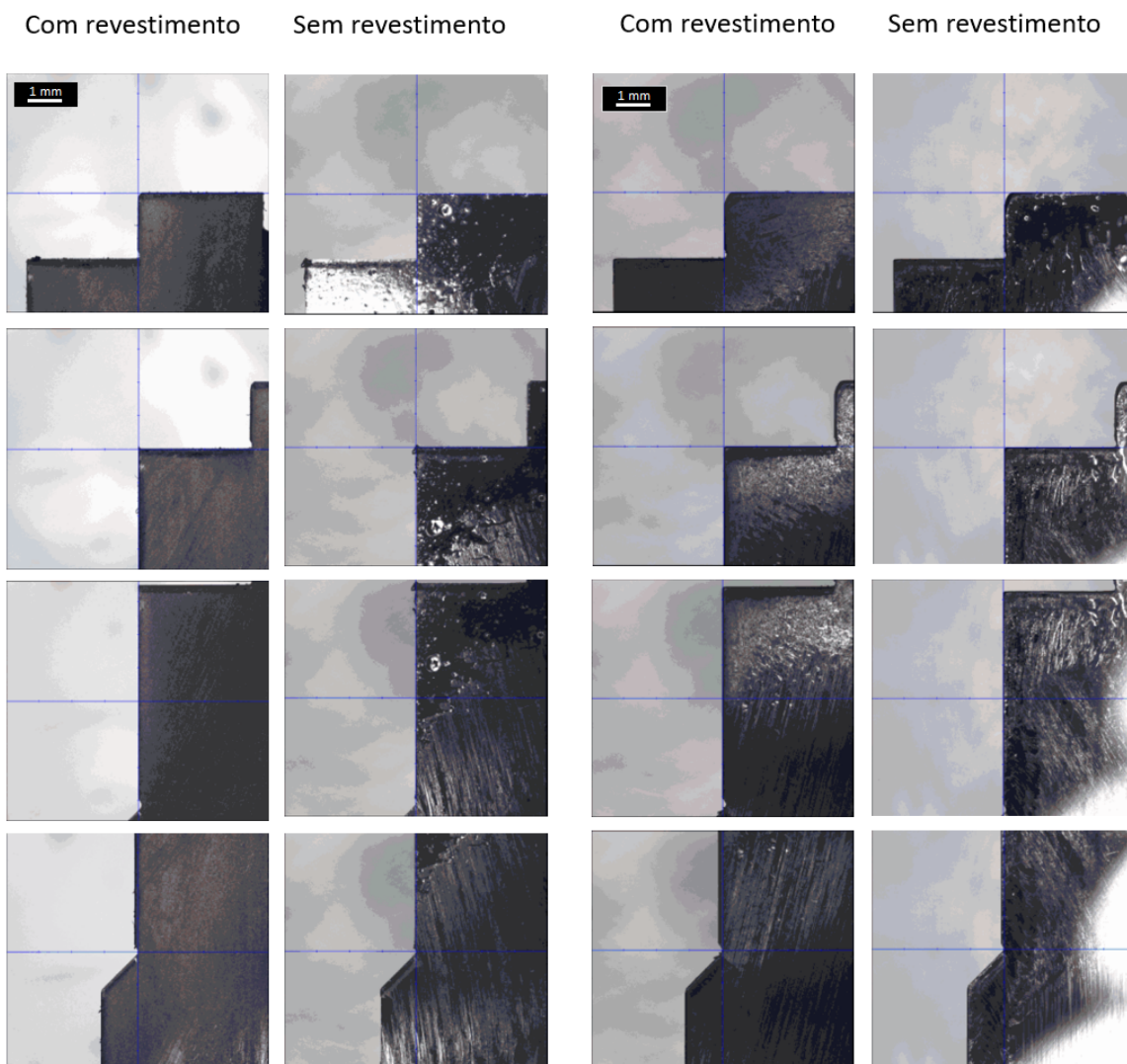


Figura 4.15: Superfície das ferramentas de corte, com (AlCrN) e sem revestimento, após 1 peça produzida

Figura 4.16: Superfície das ferramentas de corte, com (AlCrN) e sem revestimento, após 4000 peças produzidas

A ferramenta sem revestimento, apresenta algum desgaste, de cerca de $200\ \mu\text{m}$ na aresta de topo e algum arredondamento, sendo contudo inferior aos valores apresentados pelos revestimentos.

Dos resultados apresentados, é possível verificar que os níveis de produção foram corretamente escolhidos, quer pela pouca variação dos esforços de corte com a produção, quer pelo desgaste das ferramentas verificado. Visto que, o registo médio destas ferramentas ronda as 17500 peças, caso a monitorização prosseguisse, seria conveniente a utilização de intervalos de produção mais curtos.

À partida, os defeitos das peças de fundição foram sendo diluídos com o volume de produção e com o desfasamento temporal que ocorreu entre registos. De entre os defeitos destacam-se as

variações dimensionais dos furos (± 1 mm no diâmetro), as variações da liga de latão e ainda a qualidade superficial do componente, com o aparecimento ocasional de grãos de areia incrustados na superfície. A validação dos resultados pode também ser discutida, já que apenas quatro ferramentas revestidas foram testadas (duas de cada revestimento) e apenas uma ferramenta sem revestimento foi usada como comparação.

Para que a hipótese da utilização destes revestimentos nas ferramentas seja válida e economicamente viável, e de acordo com a Tabela 4.2, as ferramentas revestidas a AlCrN e AlTiN deverão efetuar uma produção de 22500 e 23000 peças, respetivamente.

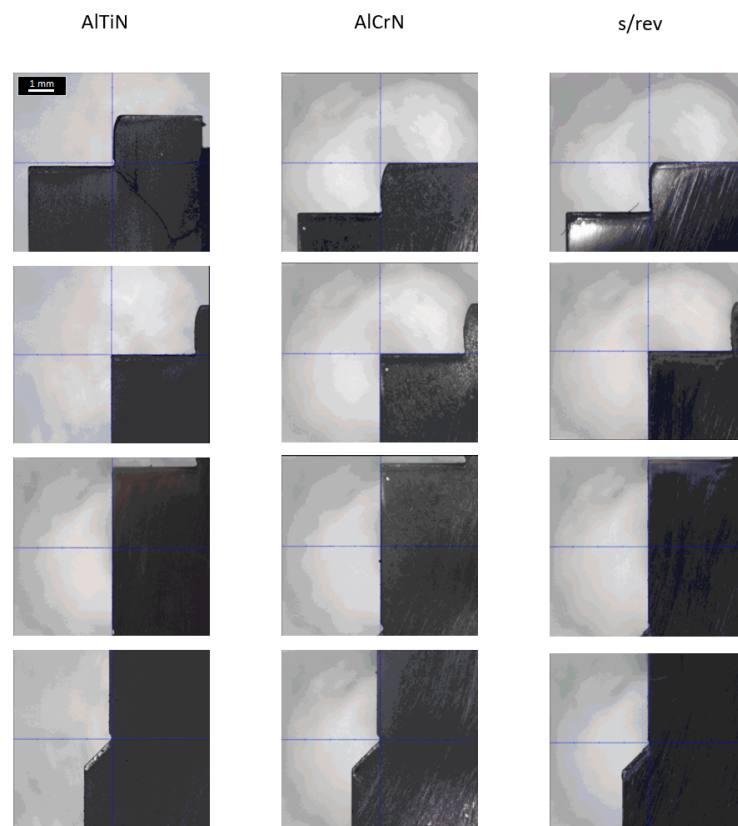


Figura 4.17: Superfície das ferramentas de corte, para os níveis de produção de 7280, 8280 e 4400 peças para as ferramentas AlTiN, AlCrN e sem revestimento, respetivamente

4.3.2 Apara

A apara gerada, à semelhança do previsto na secção anterior para este tipo de liga L (ver Figura 3.24, L15), é uma apara curta e quebrada, tendo sido constante ao longo de todos os ensaios efetuados e de todas as ferramentas utilizadas, como exemplifica, para um dos ensaios, a Figura 4.18.

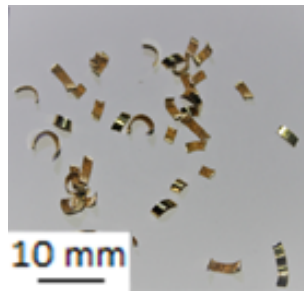


Figura 4.18: Apara gerada na maquinagem de latão, para as condições de corte $V_c = 240$ m/min e $f_n = 0.24$ mm/rot

Capítulo 5

Algumas Propostas de Melhoria do Processo Produtivo

Atualmente, um dos grandes objetivos da indústria de produção é a eliminação de desperdícios e poupanças económicas, tudo com vista a uma maior rentabilidade e taxa produtiva. Existem diversas metodologias e ferramentas LEAN (minimização de desperdícios e aumento de produção), tais como SMED, Poka-Yoke, 5S, 6Sigma, entre muitas outras [65]. Cada uma destas ferramentas e metodologias procura minimizar e/ou resolver diferentes tipos de problemas, consoante a indústria e o tipo de problemas. Entre muitos problemas e desperdícios, estas ferramentas procuram solucionar casos tais como a minimização de desperdício, através do aumento da qualidade dos produtos, a minimização de tempos ditos "mortos" e a organização no trabalho.

Este capítulo procura identificar problemas, possíveis melhorias e implementar soluções capazes de, no final, se traduzirem em ganhos para a empresa. As diversas melhorias implementadas na secção foram introduzidas como:

- Diminuição de tempos de ciclo;
- Otimização da geometria de corte de ferramentas;
- Controlo de qualidade (calibre especial).

5.1 Tempos de Ciclo

Numa produção em massa, como é o caso da GROHE, com uma cadência de milhares de peças diárias, os tempos de ciclo são de extrema importância, onde décimas de segundo têm um impacto muito grande na produção. Os centros de maquinagem CNC, desempenham um papel vital na produção onde, a partir de códigos CNC, toda a maquinagem é programada. Cada produto, para ser maquinado num centro CNC, necessita de um programa correspondente, onde é discriminada toda a sequência de maquinagem. Esta sequência, para além das operações de maquinagem propriamente ditas, engloba instruções de troca de ferramentas. Ora, o tempo dispendido nesta troca

de ferramentas, não é tempo útil de trabalho para máquinas que não possuam um sistema de dupla pinça. Uma das máquinas CNC presentes na secção de maquinagem da empresa não possui essa característica, pelo que foi alvo de estudo nesse sentido. Para além das suas características nominais, este equipamento possui algumas particularidades, isto é, o seu sistema de revólver não funciona na totalidade. Algumas posições do revólver encontram-se bloqueadas (26 de 42), tal como ilustra a Figura 5.1, pois existem problemas nas pinças que suportam as ferramentas.

O ganho neste equipamento reside num correto posicionamento, sequencial e de acordo com o programa CNC, das ferramentas de corte. O correto posicionamento das ferramentas no revólver, impede que este tenha cursos maiores do que o necessário, sempre que se troca uma ferramenta.

Este equipamento maquina uma reduzida variedade de produtos, cerca de 4 ou 5 referências diferentes, pelo que a produção é, em regra, contínua (sem trocas de produto). Tendo em conta esta continuidade, qualquer ganho irá ter um impacto tanto maior quanto maior for o número de ciclos. As poucas referências de produtos maquinadas neste centro CNC, partilham um grande número de ferramentas, apesar de não estarem sempre na mesma ordem do programa CNC. Ou seja, num produto a sequência de ferramentas pode ser A, B, C e D, enquanto que, para outro produto, a sequência pode ser A, C, D, E e B. Aquando da libertação da máquina para um novo produto, estas alterações devem ser sempre feitas, implicando algum investimento inicial de tempo de preparação, posteriormente ganho com o tempo de ciclo.

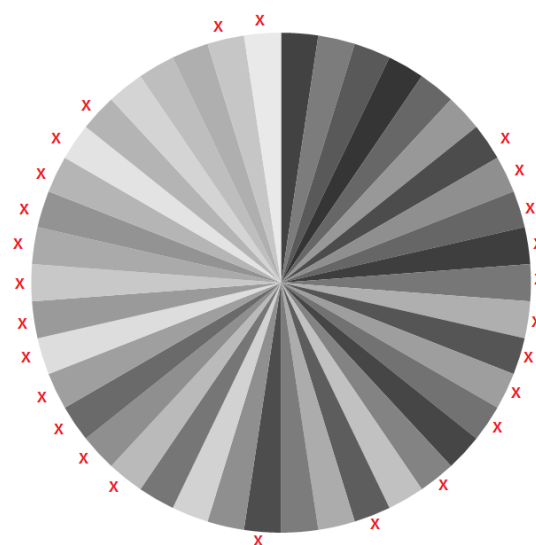


Figura 5.1: Representação esquemática de revólver de ferramentas, de uma máquina CNC, com 42 posições

Efetuuou-se portanto um estudo sobre o posicionamento das ferramentas no revólver e tempos de ciclo, para dois produtos diferentes, após o qual se implementaram algumas correções. Entre os tempos medidos podem destacar-se os tempos de troca de ferramenta e os tempos reais de maquinagem (com posicionamento aleatório das ferramentas), sendo que os tempos de ciclo foram definidos aquando da primeira produção de cada produto. A Tabela 5.1 e a Figura 5.2 ilustram os resultados obtidos para o estudo em causa.

Tabela 5.1: Número de trocas de ferramenta e tempos de produção por peça em [s]

Produto	Nr. Trocas		Tempo de troca		Tempo ciclo por peça	Tempo real por peça	Ganho por peça
	Sequencial	Aleatória	Sequencial	Aleatória			
			s		s	s	s
A	8	7	5.57	9.1	87.5	96.25	3.09
B	8	7	5.19	9.18	87.5	97.5	3.99

Os resultados evidenciam uma diferença acentuada entre os tempos de ciclo e os tempos medidos. Tais variações prendem-se com os posicionamentos incorretos das ferramentas e ainda, com ajustes feitos ao longo do tempo que, no decorrer das produções subsequentes, não foram retificados. Esses ajustes podem envolver diminuições dos parâmetros de corte, sejam eles nas velocidades de corte ou avanços. O estudo deste tipo de efeitos é benéfico para a empresa, independentemente do posicionamento do revólver, pois permite que esses ajustes sejam desfeitos (caso possível) ou que então seja feito um reajuste no tempo de ciclo, para que o tempo de ciclo iguale o tempo real.

Quanto ao incorreto posicionamento das ferramentas no revólver, as melhorias são bastante acentuadas, sendo que se pode verificar em média, que metade das trocas podem ser melhoradas. Verifica-se que a diferença entre o tempo de troca sequencial e o tempo de troca de ferramentas não ordenadas é bastante significativa ($\simeq 3.7$ s).

O ajuste do revólver varia de produto para produto, consoante o número de ferramentas utilizadas. No entanto, considerando um tempo para o ajuste inicial de 10 minutos, o investimento passa a compensar após uma produção mínima de 200 peças. Sabendo que a cadência dos produtos é na ordem das largas centenas ou mesmo milhares, este efeito beneficia a eficiência do processo.

5.2 Geometria de Ferramentas

Para cada novo produto que seja feito, é necessária a adoção de um conjunto de ferramentas correto, capaz de satisfazer os requisitos geométricos. De modo análogo, quando alguma alteração é feita no projeto ou na sequência de maquinagem, é necessário verificar se esse mesmo conjunto, continua ou não a ser o mais adequado para o efeito.

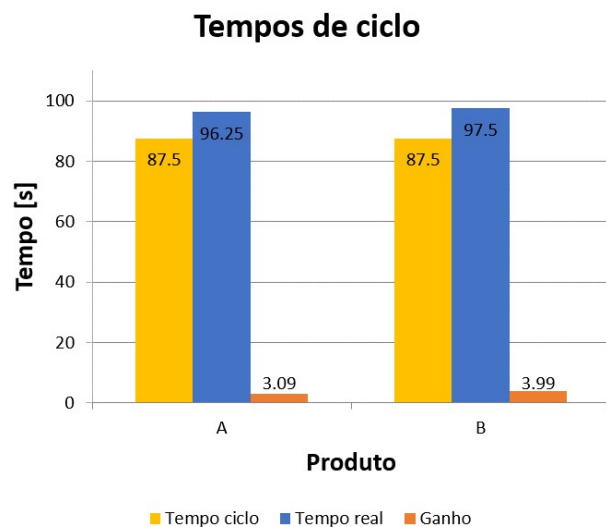


Figura 5.2: Tempo ganho por peça com troca eficiente de ferramentas

Um caso muito particular desta mesma análise é a ferramenta de corte, que apresenta a geometria representada na Figura 5.3 e cuja função é perfilar furos num componente de chuveiro (Figura 4.5). Por razões de qualidade e simplificação do processo de lixamento e polimento, foi modificada a sequência de maquinagem de produtos, que utilizam esta mesma ferramenta.

A alteração consistiu em adicionar uma fresa ao processo, anterior à furação, que efetua o facejamento da superfície adjacente aos furos. Com esta modificação, apenas a geometria interna do furo necessita de ser cumprida pelo que, a aresta horizontal (assinalada a vermelho na Figura 5.3 a)) é desnecessária, dando origem a uma modificação bastante grande no perfil da ferramenta, representada na Figura 5.3 b). A aresta assinalada a vermelho, não foi totalmente removida, mas sim reduzida, a cerca de 2 mm, pois auxilia bastante na deteção imediata de qualquer anomalia na furação (profundidade excessiva).

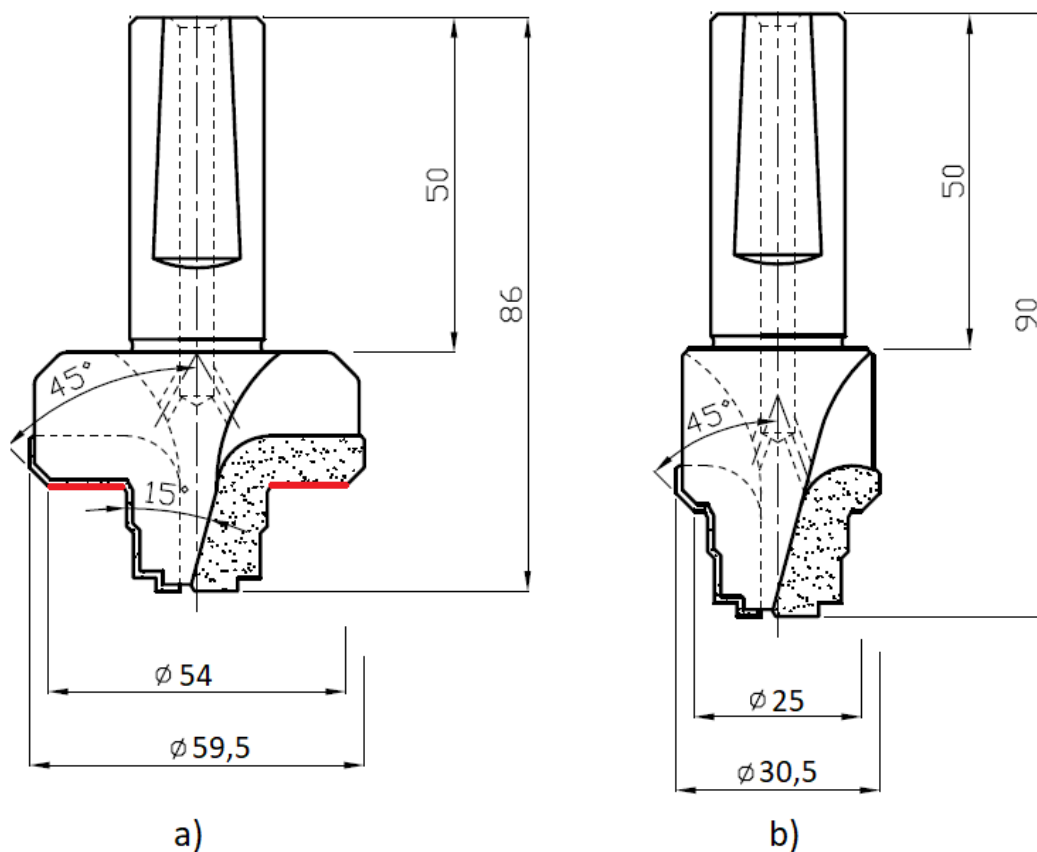


Figura 5.3: Ferramenta antiga com aresta de facejamento (a) e ferramenta nova sem aresta de facejamento (b)

As vantagens com esta poupança são notórias a vários níveis:

- Preço - devido à drástica diminuição da aresta de corte, a quantidade de metal duro, constituinte da ferramenta, diminui bastante, levando a uma diminuição do preço (Tabela 5.2);
- Parâmetros de corte - tendo em conta a nova geometria da ferramenta (menor diâmetro) e sabendo que a rotação (n) é diretamente proporcional ao diâmetro, este parâmetro (n) pode

ser aumentado, para um mesmo desgaste da ferramenta e uma mesma velocidade de corte (V_c);

- Esforço na máquina - após as alterações efetuadas, optou-se por manter os parâmetros de corte. Esta alteração geométrica, aliada aos mesmos parâmetros de corte, leva à diminuição de vibrações no cabeçote da máquina, o que se traduz em menores esforços e consequentes folgas. Com isto, promove-se também um aumento do tempo de vida do equipamento.

Tabela 5.2: Preço da ferramenta com e sem a aresta de facejamento, referência antiga e nova respetivamente

Ferramenta	Nova [u.m.]	Reparação [u.m.]	Afiamento [u.m.]	Produção (nº de peças)
Refª antiga	126.5	85	25	9400
Refª nova	100	78	25	17500

Os preços, na Tabela 5.2, são apresentados em unidades monetárias e tomam como referência o valor de uma ferramenta nova, da referência nova. Para além de se verificar uma redução de custos entre as duas referências, denota-se também uma grande poupança ao nível do rendimento da ferramenta. Embora a aresta a vermelho não desempenhe, aparentemente, um papel ativo no processo de maquinagem, a sua contribuição para o equilíbrio da ferramenta é bastante grande, como comprova a produção. O aumento de produção encontra-se na ordem dos 80 % o que, aliado à diminuição do preço, contribuem para uma melhoria considerável.

Sabendo que, no ano civil transato, foram comercializadas 6 ferramentas novas e feitas 42 reparações, os ganhos ultrapassam as centenas de euros. O desgaste observado da ferramenta, após a modificação, continuou a dar-se na mesma zona da ferramenta, nas arestas de corte da parte superior.

5.3 Qualidade

A qualidade é um dos pilares de qualquer processo produtivo sendo que, a sua garantia, nem sempre é fácil de assegurar. Num meio industrial, com uma cadência produtiva tão grande, é importante que qualquer empresa procure estabelecer a qualidade como um dos seus pilares de operação.

Numa outra perspetiva, diferente das subsecções anteriores, procurou-se efetuar alguma melhorias no que à qualidade dizem respeito. A produção dos componentes e produtos que a GROHE manufatura, obedecem a rigorosas métricas dadas pela casa-mãe, na Alemanha. Uma das métricas mais rigorosas está relacionada com a parte dimensional onde, na maioria dos casos, cabe a calibres passa/não passa efetuar essa mesma validação (no departamento de maquinagem). Nem todas as geometrias são possíveis de verificar com este tipo de sistema, no entanto, sempre que possível, são aconselhados estes dispositivos e desaconselhados dispositivos como paquímetros, pois podem induzir erros de manuseamento.

Um dos produtos fabricados pela GROHE Albergaria, tem uma geometria bastante peculiar (rasgo na Figura 5.4) que, para controle dimensional, utiliza apenas um paquímetro. Apesar da ferramenta de corte (disco) quase garantir a espessura do rasgo, existem outros requisitos que necessitam de ser cumpridos, entre os quais a horizontalidade do rasgo, a distância deste ao topo da peça e a própria espessura do rasgo, que pode ser afetada com o desgaste da ferramenta. Para tal, procurou-se desenvolver um calibre especial, de apoio à produção, capaz de verificar as dimensões geométricas exigidas. Visto que existem 5 referências de produtos semelhantes, foram desenvolvidos 3 calibres capazes de verificar as diversas referências. Os calibres desenvolvidos apenas diferem entre si nalgumas dimensões, devidas a pequenas variações existentes nos próprios produtos. A Figura 5.5 ilustra uma primeira aproximação do calibre final obtido.

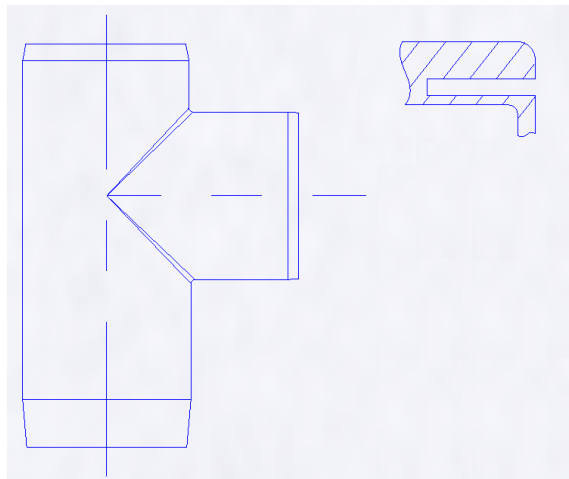


Figura 5.4: Pormenor da geometria de um componente maquinado

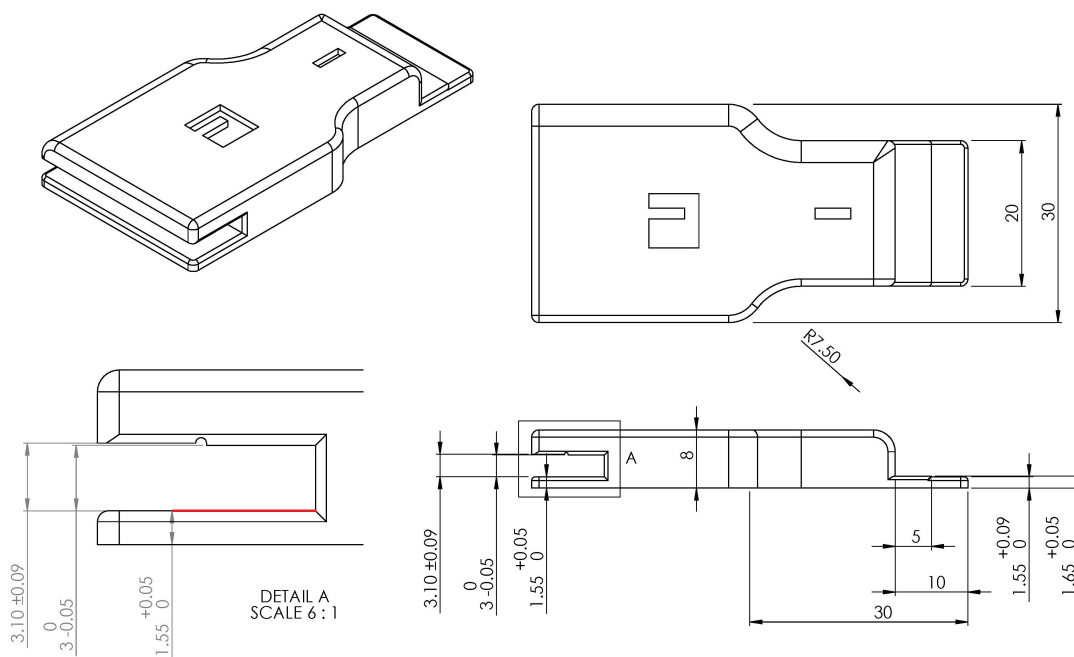


Figura 5.5: Esquema de calibre passa/não passa

A parte do calibre ilustrada à direita tem como função validar a horizontalidade do rasgo e a espessura do mesmo. A parte ilustrada à esquerda, com uma vista em pormenor, permite validar a distância e horizontalidade do rasgo ao topo da peça. Em termos construtivos, o calibre foi fabricado em duas metades para que se pudessem atingir tolerâncias de controlo ainda mais

apertadas do que o apresentado, com a linha de separação a ser definida pela linha a vermelho na figura. Embora o calibre ainda não esteja em produção, será decerto útil a quem necessitar de fazer validações geométricas.

Capítulo 6

Conclusões e Perspetivas de Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

O trabalho de dissertação permite inferir algumas conclusões respeitantes à maquinabilidade de ligas de latão, tendo em conta a variação de chumbo na sua composição, nomeadamente em parâmetros de corte (V_c , a_p e f_n) e características das próprias ligas (pressão específica de corte e dureza). Os objetivos do trabalho realizado foram atingidos e as principais ilações retiradas são as seguintes:

- A quantidade de energia (P_c) necessária à maquinagem das ligas de latão é considerável e pode ser otimizada consoante os parâmetros de corte utilizados. As ligas L e R apresentam valores semelhantes sendo que a liga Z apresenta potências de corte bastante superiores (até 3000 W). A potência de corte é proporcional a todos os parâmetros de corte (avanço, velocidade de corte e profundidade de corte).
- Na gama utilizada para os ensaios experimentais (V_c : 80 a 425 m/min, a_p : 0.25 a 1.5 mm e f_n : 0.05 a 0.25 mm/rot), todos os parâmetros de corte, V_c , a_p e f_n , têm uma contribuição significativa para a potência de corte, com uma percentagem de 15, 40 e 20 %, respetivamente. Para além da contribuição de cada variável em separado, as interações entre variáveis têm também um peso relevante, cerca de 8 a 9% cada, no caso de $V_c * a_p$ e de $a_p * f_n$. Por esta análise, conclui-se que o principal elemento que deve ser minimizado e/ou controlado é a profundidade de corte.
- A pressão específica de corte assume um decréscimo exponencial com o avanço, até que estabiliza, normalmente, naquele que é considerado o valor de referência para o material. Os ensaios realizados não permitiram a obtenção desse valor referência, pois a gama de avanços (f_n) utilizada foi reduzida. Contudo, foi possível ver o comportamento desta grandeza com os diversos parâmetros de corte ensaiados.

- A pressão específica de corte, K_s , está intrinsecamente interligada com a potência de corte. No entanto, para K_s , a variável com maior peso no resultado é o avanço. Para as ligas L e R o avanço (f_n) tem um peso de aproximadamente 65%, enquanto que a_p tem uma contribuição de perto de 10%, sendo o restante atribuído a outras variáveis e resíduos. No caso da liga Z, os resultados diferem bastante com a velocidade de corte e a profundidade de corte a terem influências semelhantes (17 e 12%, respetivamente), enquanto o avanço, f_n , se destaca como principal influência (36%). Para a liga Z, os resultados não são tão conclusivos quanto para as outras ligas, pois a sua análise apresenta um resíduo de cerca de 20%.
- Os esforços de corte são bastante distintos consoante as ligas, apresentando mais uma vez as ligas L e R comportamentos similares, enquanto que a liga Z apresenta esforços bastante mais elevados. Quanto à força de corte, elemento com maior contribuição na força total de maquinagem, as ligas L e R apresentam valores máximos de cerca de 300 N enquanto que, a liga Z, apresenta valores máximos das forças de corte na ordem dos 450 N. Pela análise efetuada é possível ver a grande influência direta que o chumbo tem nas forças de corte, incrementando fortemente os esforços com a sua diminuição.
- Pela ANOVA efetuada, verifica-se que as variáveis relevantes para as forças de corte são a profundidade de corte (a_p), o avanço e a interação entre ambos ($a_p * f_n$), com pesos de 60, 30 e 10%, respetivamente. Para crescentes avanços e profundidades de corte foram registadas crescentes forças de corte.
- Quanto à apara obtida nos ensaios, mais uma vez a influência do elemento chumbo na composição química das ligas é notória. Para as ligas L e R obtêm-se maioritariamente aparas curtas e quebradas, enquanto que para a liga Z a apara é essencialmente em fita e helicoidal. De notar que a velocidade de corte tem pouca influência na configuração da apara, enquanto que a profundidade de corte revela-se importante. Com o aumento de a_p , a configuração da apara torna-se cada vez mais longa e fitada. No decorrer dos ensaios não foi detetada qualquer tipo de apara aderente.
- Todos os parâmetros de rugosidade avaliados (R_a , R_{max} e R_z) têm o mesmo tipo de comportamento consoante os diferentes parâmetros. Com o aumento da profundidade de corte e do avanço, as rugosidades sofrem um aumento, ao invés da velocidade de corte que pouca influência tem nestes parâmetros. Segundo a ANOVA, a rugosidade é quase exclusivamente influenciada pelo avanço nos casos das ligas L e R, com uma contribuição média de 96%. No caso da liga Z, a ANOVA não é conclusiva sendo que, cerca de 70% é atribuído a erro.
- A ANOVA revelou-se de grande utilidade para a análise dos parâmetros de corte e da sua influência nos diversos resultados, confirmando e aprofundando a análise dos resultados até então obtidos, com uma quantificação palpável. Com esta análise foi possível quantificar os efeitos das variáveis dos parâmetros de corte nos parâmetros analisados (P_c , K_s , F_c e rugosidades).

- Os ensaios de furação revelam diferenças consideráveis consoante a produção feita pelas ferramentas. Para cada ferramenta, revestida ou não, para a primeira peça furada as forças de avanço (F_z) são consideravelmente menores do que quando as ferramentas atingem níveis de produção elevados. Em todos os casos, as ferramentas revestidas têm maiores forças de avanço, quando comparadas com a ferramenta sem revestimento. Tal facto pode ser explicado e entendido por uma modificação do gume da aresta de corte pela deposição do revestimento. Para a 1ª peça, as forças nas ferramentas atingem valores na ordem dos 200 N enquanto que, para a produção da peça 4000ª e da última registada, os valores encontram-se entre os 600 e os 1000 N.
- Quanto ao binário de corte, este mantém-se essencialmente constante para as diversas ferramentas e consoante o nível de produção efetuado. As forças no plano (F_x e F_y) têm um perfil irregular, devido a desvios no posicionamento das peças, e a sua contribuição para a força de maquinagem é relativamente reduzida na maioria dos casos.
- O desgaste nas ferramentas consoante a produção faz-se notar, sobretudo, no topo das mesmas e é muito semelhante entre revestimentos. A ferramenta sem revestimento, após 4400 peças produzidas denota já algum desgaste acentuado. Para o caso das ferramentas com o revestimento AlTiN, após 7280 peças produzidas, o desgaste é demasiado elevado para que esta continue em operação, devendo então ser retirada. O revestimento AlCrN aparenta ser aquele que tem uma maior resistência ao desgaste. Após 8280 peças produzidas, as ferramentas apresentam um desgaste acentuado, pelo que devem ser igualmente substituídas. *A priori*, sem ter analisado a ferramenta sem revestimento com um maior nível de produção e desgaste, pode afirmar-se que os revestimentos podem ser uma solução para incrementar o tempo de vida das ferramentas de corte. O revestimento AlCrN aparenta ser uma melhor solução do que o AlTiN.
- As melhorias trazidas ao processo produtivo são interessantes essencialmente pela possibilidade que representam de, ao serem mais exploradas, trazerem grandes retornos e melhorias para a empresa, nomeadamente para o departamento de maquinagem.

6.2 Perspetivas de Trabalhos Futuros

O estudo desenvolvido pretende auxiliar a perceção da maquinabilidade de ligas com pouco teor em Pb, ainda limitada. No sentido de caracterizar a maquinabilidade e otimizar os parâmetros de corte na maquinagem de ligas de latão foram realizados diversos ensaios experimentais, ainda que diversos aspetos não tenham sido contemplados. Deste modo, como proposta para complementar o trabalho realizado, sugere-se para trabalhos futuros:

- Alargar os estudos de maquinabilidade das ligas sem chumbo para poder prever/simular o comportamento das ferramentas para essas mesmas ligas, através de modelos analíticos ou numéricos;

- Realizar ensaios complementares de modo a poder caracterizar mecanicamente o material (ensaio de tração ou compressão);
- Para além dos ensaios de torneamento realizados será de interesse a realização de ensaios experimentais de furação, com vista à otimização dos parâmetros de corte neste processo, sendo a furação o processo que mais se assemelha ao praticado na empresa;
- Aplicar o método Taguchi na realização de ensaios experimentais, com vista à realização do número mínimo de ensaios para extrair a maior quantidade de informação possível;
- Utilizar diferentes classes de metal duro nos insertos brazados e verificar qual o seu impacto na durabilidade das ferramentas;
- Verificar a possibilidade de introdução de quebra-aparas nas ferramentas, com especial importância nas ligas com baixo teor de chumbo, para maior facilidade na quebra da apara;
- Estudar e experimentar diferentes revestimentos na ferramenta de referência estudada e noutras, fazendo uma monitorização regular do desempenho das mesmas, bem como testar diferentes técnicas de aplicação;
- Utilizar a câmara de PVD existente na empresa de modo a testar diferentes revestimentos (espessuras, materiais e multicamada), reduzindo assim os custos internos e aumentando a durabilidade das ferramentas de corte;
- Realizar ANOVA no caso dos ensaios de furação, ou no estudo de maquinagem com ferramentas revestidas, para um maior rigor na análise dos resultados;
- Transitar de ferramentas de metal duro para PCD em todos os casos que tal seja possível, essencialmente para operações de acabamento;
- Estudar a possibilidade de transição de machos para fresas sempre que necessário um perfil roscado, tendo em consideração a qualidade e acabamentos superficiais requeridos. Para além de uma fresa poder fazer diversos diâmetros e com um menor desgaste, permite uma maior versatilidade das ferramentas (redução de *stocks*);
- Estudar e implementar o método MQL com vista à redução da quantidade de lubrificante utilizado e aumento da eficiência na refrigeração.

Referências

- [1] GROHE - Grohe AG Company Page - Welcome to GROHE, URL:<https://www.grohe.com/>. 2017, [Acedido em Março 2017].
- [2] OW US EPA. Use of Lead Free Pipes, Fittings, Fixtures, Solder and Flux for Drinking Water, URL:<https://www.epa.gov/dwstandardsregulations/use-lead-free-pipes-fittings-fixtures-solder-and-flux-drinking-water>. 2015, [Acedido em Março 2017].
- [3] Fredrik Schultheiss, Daniel Johansson, Volodymyr Bushlya, Jinming Zhou, Kent Nilsson, e Jan-Eric Ståhl. Comparative study on the machinability of lead-free brass. *Journal of Cleaner Production*, 149:366–377, Abril 2017.
- [4] Sandvik Coromant - manufacturing tools & machining solutions, URL:<http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/pages/default.aspx>. 2017, [Acedido em Abril 2017].
- [5] Ricardo Augusto Bastos Batista. *Tendências do corte por arranque de apara-maquinagem*. Tese de doutoramento, FEUP, 2010.
- [6] DVK SYSTEM S.R.L. – MASTER & TRANSFER, URL:<http://www.dvksystem.it/en>. 2017, [Acedido em Abril 2017].
- [7] Haas Automation®, Inc. | CNC Machine Tools Made in the USA | Best in CNC Milling and Lathe Value, URL:<http://haascnc.com/home.asp>. 2017, [Acedido em Abril 2017].
- [8] Ricardo António Coimbra Homem. *Estudo do processo de maquinagem de ligas de titânio*. Tese de doutoramento, FEUP, Porto, 2014.
- [9] Mikell P Groover. *Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems*. John Wiley & Sons, 2007.
- [10] João Paulo Davim. *Princípios da maquinagem*. Livraria Almedina, Coimbra, 1995.
- [11] Dino Ferraresi. *Fundamentos Da Usinagem Dos Metais*. Editora Edgard Blucher, 1970.
- [12] MITSUBISHI MATERIALS Web Catalog -Turning Tools, Rotating Tools, Tooling Solutions, URL:<http://www.mitsubishicarbide.net/>. [Acedido em Abril 2017].
- [13] João Luís de Oliveira Guimarães. *Estudo de ferramentas de corte para novos materiais*. Tese de doutoramento, FEUP, 2009.
- [14] CES Edupack 2013 (Granta Design Limited, 2013).
- [15] Philippe Boisse, Taylan Altan, e Kees van Luttervelt. *Friction and flow stress in forming and cutting*. Kogan Page Publishers, 2003.

- [16] ISO 513:2012. *Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges – Designation of the main groups and groups of application*. ISO, Geneva, Switzerland, 2012.
- [17] Taek-Jung Shin, Jeang-Ook Oh, Kyu Hwan Oh, e Dong Nyung Lee. The mechanism of abnormal grain growth in polycrystalline diamond during high pressure-high temperature sintering. *Diamond and Related Materials*, Março 2004.
- [18] RUN Faster – 5me Cryogenic Machining, URL:<http://5me.com/cryogenic-machining/benefits-of-cryo/>. [Acedido em Março 2017].
- [19] Palbit, URL:<http://www.palbit.pt/pt/>. [Acedido em Abril 2017].
- [20] Ruko gmbh precisions tools, URL:<http://www.ruko.de/englisch/start%20en.htm>. [Acedido em Abril 2017].
- [21] Assinfresa fabricação e afiação de ferramentas especiais, URL:<http://assinfresa.com.br/produtos/ferramentas-mds>. [Acedido em Abril 2017].
- [22] Walter tools - engineering kompetenz for turning, holemaking, milling and threading solutions, URL:<http://www.walter-tools.com/en-gb/pages/default.aspx>. [Acedido em Abril 2017].
- [23] Preziss pcd cutting tools | preziss: Technology partner for your cutting tools, URL:<http://www.preziss.com/>. [Acedido em Abril 2017].
- [24] Balkrishna Rao e Yung C. Shin. Analysis of Three-Dimensional Machining Using an Extended Oblique Machining Theory. *Machining Science and Technology*, 2002.
- [25] E. Lugscheider, O. Knotek, C. Barimani, e H. Zimmermann. Arc PVD-coated cutting tools for modern machining applications. *Surface and Coatings Technology*, 94:641–646, Outubro 1997.
- [26] IHI Hauzer Techno Coating B.V. IHI Hauzer Techno Coating B.V., URL:<http://www.hauzertechnocoating.com/en/other/>. 2017, [Acedido em Maio 2017].
- [27] Acree technologies - cathodic Arc Deposition, URL:<http://www.acreetech.com/index.php/pvd-technology/cathodic-arc-deposition>. [Acedido em Maio 2017].
- [28] Prirev - Engenharia de Superfícies, URL:<http://www.prirev.com/pt>. 2013, [Acedido em Maio 2017].
- [29] CemeCon, URL:<http://cemecon.de/>. 2017, [Acedido em Maio 2017].
- [30] Y. Sahin e G. Sur. The effect of Al₂O₃, TiN and Ti (C,N) based CVD coatings on tool wear in machining metal matrix composites. *Surface and Coatings Technology*, páginas 349–355, Fevereiro 2004.
- [31] J. C. Avelar-Batista, E. Spain, M. Letch, J. Housden, e R. Beechey. Improvements on the wear resistance of high thermal conductivity Cu alloys using an electroless Ni–P coating prior to PVD deposition. *Surface and Coatings Technology*, páginas 4052–4057, Dezembro 2006.
- [32] Arno Köpf, Stefan Feistritzer, e Klaus Udier. Diamond coated cutting tools for machining of non-ferrous metals and fibre reinforced polymers. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, páginas 354–359, Setembro 2006.

- [33] Marco Sortino, Sandro Belfio, Giovanni Totis, Elso Kuljanic, e Giovanni Fadelli. Innovative Tool Coatings for Increasing Tool Life in Milling Nickel-coated Nickel-silver Alloy. *Procedia Engineering*, páginas 946–952, Janeiro 2015.
- [34] F. A. P. Fernandes, J. Gallego, C. A. Picon, G. Tremiliosi Filho, e L. C. Casteletti. Wear and corrosion of niobium carbide coated AISI 52100 bearing steel. *Surface and Coatings Technology*, páginas 112–117, Outubro 2015.
- [35] Ya-guang Han, Yong Yang, Lei Wang, Xue-guang Chen, Zhen-hua Chu, Xu-ning Zhang, Yan-chun Dong, Zhe Liu, Dian-ran Yan, Jian-xin Zhang, e Chong-gui Li. Microstructure and properties of in-situ TiB₂ matrix composite coatings prepared by plasma spraying. *Applied Surface Science*, 2017.
- [36] E. Lugscheider, O. Knotek, H. Zimmermann, e S. Hellmann. Investigation of the mechanical and structural properties of Ti–Hf–C–N arc PVD coatings. *Surface and Coatings Technology*, 1999.
- [37] Chi-Lung Chang e Chung-Wei Wu. Tribological and corrosion behaviors of tisi (n, o) coatings prepared by cathodic arc plasma deposition. *Thin Solid Films*, 517(17):5219–5223, 2009.
- [38] Oerlikon Group – Balzers, Metco, Barmag, Neumag, Graziano, Fairfield « Oerlikon Corporate, URL:<https://www.oerlikon.com/en/>. 2017, [Acedido em Maio 2017].
- [39] R. Edwards. *Cutting tools*. <<The>> Institute of Materials, London, 1993.
- [40] Rui Miguel Brás Soares. *Estudos de Maquinabilidade da Liga AlSi9Cu3 Recorrendo a Ferramentas PCD com Quebra-Aparas*. Tese de doutoramento, FEUP, 2016.
- [41] José Manuel de Simões Morais. *Desenho técnico básico*. Número 3 em Desenho de construções mecânicas. Porto Editora, 23^a ed edição, 2006.
- [42] Copper Development Association et al. Cost-effective manufacturing machining brass, copper and its alloys. *Publication TN44*, página 45, 1992.
- [43] Used machines for the steel structure industry - used steel machinery, URL:<https://www.nenok.com/>. [Acedido em Março 2017].
- [44] Beku Oil | Home, URL:<http://www.bekuoil.de/>. [Acedido em Março 2017].
- [45] António Esteves Correia. Uma abordagem à maquinagem a alta velocidade, com recurso a turbinas pneumáticas de alta rotação. Tese de mestrado, Universidade de Aveiro, 2005.
- [46] Minimum quantity lubrication - mql - metal cutting fluids | unist, URL:<http://unist.com/mql-machining.html>. [Acedido em Março 2017].
- [47] Christoph Nobel, Uwe Hofmann, Fritz Klocke, Drazen Veselovac, e Hendrik Puls. Application of a new, severe-condition friction test method to understand the machining characteristics of Cu–Zn alloys using coated cutting tools. *Wear*, páginas 58–68, Dezembro 2015.
- [48] Christoph Nobel, Fritz Klocke, Dieter Lung, e Sebastian Wolf. Machinability Enhancement of Lead-free Brass Alloys. *Procedia CIRP*, 14:95–100, Janeiro 2014.

- [49] Mário Márcio Wilborn, Felipe Dalla Vecchia, Halston Mozetic, Eduardo Luis Schneider, Cláudia Trindade Oliveira, e Lírío Schaeffer. Influência do tratamento térmico no empenamento de latão durante o processo de usinagem por fresamento de topo. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, páginas 14–22, Janeiro 2013.
- [50] Fernando Portela de Castro e José Manuel Junqueira. *Latões para Fundição*. Cadernos de Metalurgia. CETEM - Centro Técnico de Engenharia Mecânica, Metalúrgica e de Materiais, Barcelos, 1996.
- [51] DD Davies. A note on the dezincification of brass and the inhibiting effect of elemental additions. *New York: Copper Development Association Inc*, 1993.
- [52] Mohamed A. Taha, Nahed A. El-Mahallawy, Rawia M. Hammouda, Tarek M. Moussa, e Mohamed H. Gheith. Machinability characteristics of lead free-silicon brass alloys as correlated with microstructure and mechanical properties. *Ain Shams Engineering Journal*, páginas 383–392, Dezembro 2012.
- [53] Volodymyr Bushlya, Daniel Johansson, Filip Lenrick, Jan-Eric Ståhl, e Fredrik Schultheiss. Wear mechanisms of uncoated and coated cemented carbide tools in machining lead-free silicon brass. *Wear*, 376–377, Part A, Abril 2017.
- [54] F. Schultheiss, D. Johansson, M. Linde, P. L. Tam, V. Bushlya, J. Zhou, L. Nyborg, e J.-E. Ståhl. Machinability of CuZn21si3p brass. *Materials Science and Technology*, 2016.
- [55] Anagnostis I. Toulfatzis, George A. Pantazopoulos, George J. Besseris, e Alkiviadis S. Paipetis. Machinability evaluation and screening of leaded and lead-free brasses using a non-linear robust multifactorial profiler. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86, Outubro 2016.
- [56] Gan Chunlei, Song Dongfu, Zheng Kaihong, Wang Haiyan, e Zhou Nan. Failure analysis of a lead-free brass tap used in potable water. *Engineering Failure Analysis*, páginas 377–383, Janeiro 2016.
- [57] C. Vilarinho, J.P. Davim, D. Soares, F. Castro, e J. Barbosa. Influence of the chemical composition on the machinability of brasses. *Journal of Materials Processing Technology*, páginas 441–447, Dezembro 2005.
- [58] ISO 3685:1993. *Tool-life testing with single-point turning tools*. ISO, Geneva, Switzerland, 1993.
- [59] Toolsunited - rhombic inserts - mapal - dcgw11t304f01n-0aa-pu620, URL:<https://www.toolsunited.com/App/Article/ArticleDetailsPage/24696400130941028?language=en>. [Acedido em Maio 2017].
- [60] Mapal: Indexable pcd inserts, URL:<https://www.mapal.com/pt/os-produtos-padrao/gama-de-produtos/tools-with-iso-elements/indexable-inserts/indexable-pcd-inserts/>. [Acedido em Maio 2017].
- [61] Kistler | measuring systems and sensors, URL:<https://www.kistler.com/pt/en/>. [Acedido em Junho 2017].
- [62] MeasureShop.biz: Homepage, URL:<http://www.measureshop.biz/en>. [Acedido em Junho 2017].

- [63] GFV Voort. Metallography and microstructures. asm handbook, ed. Em A. *International*, volume 9, 2004.
- [64] Philip J Ross. *Aplicações das técnicas Taguchi na engenharia da qualidade*. Makron Books, 1991.
- [65] Euclides A. Coimbra. *Kaizen: Uma Estratégia de Melhoria, Crescimento e Rentabilidade*. McGraw-Hill, 20.

Anexo A

Ensaio torneamento

A Figura A.1 ilustra o desenho dos provetes de latão, utilizados nos ensaios de torneamento.



Figura A.1: Desenho dos provetes de latão utilizados nos ensaios de torneamento

Para a realização dos diversos ensaios de torneamento, foram utilizados diferentes parâmetros de corte, resumidos na Tabela A.1.

Tabela A.1: Matriz de ensaios de torneamento

Parâmetros de corte				Ligas					
n	a_p	f_n	V_c	L		R		Z	
rpm	mm	mm/rot	m/min	1	2	1	2	1	2
2500	0.25	0.05	432	L11	L21	R11	R21	Z11	Z21
		0.14		L12	L22	R12	R22	Z12	Z22
		0.25		L13	L23	R13	R23	Z13	Z23
	0.5	0.05	428	L14	L24	R14	R24	Z14	Z24
		0.14		L15	L25	R15	R25	Z15	Z25
		0.25		L16	L26	R16	R26	Z16	Z26
	1.5	0.05	420	L17	L27	R17	R27	Z17	Z27
		0.14		L18	L28	R18	R28	Z18	Z28
		0.25		L19	L29	R19	R29	Z19	Z29
1800	0.25	0.05	286	L110	L210	R110	R210	Z110	Z210
		0.14		L111	L211	R111	R211	Z111	Z211
		0.25		L112	L212	R112	R212	Z112	Z212
	0.5	0.05	283	L113	L213	R113	R213	Z113	Z213
		0.14		L114	L214	R114	R214	Z114	Z214
		0.25		L115	L215	R115	R215	Z115	Z215
	1.5	0.05	277	L116	L216	R116	R216	Z116	Z216
		0.14		L117	L217	R117	R217	Z117	Z217
		0.25		L118	L218	R118	R218	Z118	Z218
900	0.25	0.05	130	L119	L219	R119	R219	Z119	Z219
		0.14		L120	L220	R120	R220	Z120	Z220
		0.25		L121	L221	R121	R221	Z121	Z221
	0.5	0.05	129	L122	L222	R122	R222	Z122	Z222
		0.14		L123	L223	R123	R223	Z123	Z223
		0.25		L124	L224	R124	R224	Z124	Z224
	1.5	0.05	126	L125	L225	R125	R225	Z125	Z225
		0.14		L126	L226	R126	R226	Z126	Z226
		0.25		L127	L227	R127	R227	Z127	Z227
630	0.25	0.14	82	L128	L228	R128	R228	Z128	Z228
		0.25		L129	L229	R129	R229	Z129	Z229
	0.5	0.14	81	L130	L230	R130	R230	Z130	Z230
		0.25		L131	L231	R131	R231	Z131	Z231
	1.5	0.14	79	L132	L232	R132	R232	Z132	Z232
		0.25		L133	L233	R133	R233	Z133	Z233

Nas Tabelas A.2 e A.3 apresenta-se a análise de custos energéticos, relativos às potências de corte. O tempo de maquinagem foi obtido recorrendo à Equação 2.5 enquanto que, os resultados da Tabela A.3, foram obtidos através do produto dos tempos de maquinagem pelas potências de corte, para os respetivos pares. Para esta análise foi considerado $a_p = 1$ mm, pois é o valor que mais se assemelha ao processo na empresa. Este valor resulta da soma de dois fatores importantes, quer da tolerância de fundição (0.5 mm), quer da maquinagem propriamente dita que tem, normalmente, uma profundidade de corte de 0.5 mm.

Tabela A.2: Tempos de maquinagem em segundos para $l = 10$ mm

n	f_n	Tempo de corte
rpm	mm/rot	s
2500	0.05	4.80
	0.14	1.71
	0.25	0.96
1800	0.05	6.67
	0.14	2.38
	0.25	1.33
900	0.05	13.33
	0.14	4.76
	0.25	2.67
630	0.14	6.80
	0.25	3.81

Tabela A.3: Binómio parâmetros de corte vs tempo de maquinagem: custos energéticos de maquinagem para as três ligas para um comprimento de referência $l = 10$ mm, custos em unidades monetárias

n	f_n	Custos por liga [u.m.]		
rpm	mm/rot	L	R	Z
2500	0.05	1160	1013	1284
	0.14	969	909	1119
	0.25	871	814	1063
1800	0.05	1084	889	1224
	0.14	916	800	1083
	0.25	808	724	985
900	0.05	988	827	1175
	0.14	821	736	1023
	0.25	703	653	935
630	0.14	723	648	883
	0.25	612	568	797

As seguintes figuras são referentes aos esforços de corte (força de avanço, de profundidade de corte e de corte, F_a , F_p e F_c , respetivamente). A Figura A.2, A.3 e A.4 são referentes às ligas L, R e Z, respetivamente.

Como previsto, F_a e F_p são bastante menores do que F_c . No entanto, a sua contribuição para a força de maquinagem (F_m) ainda é algo significativa, para baixos valores de a_p , até 0.5 mm.

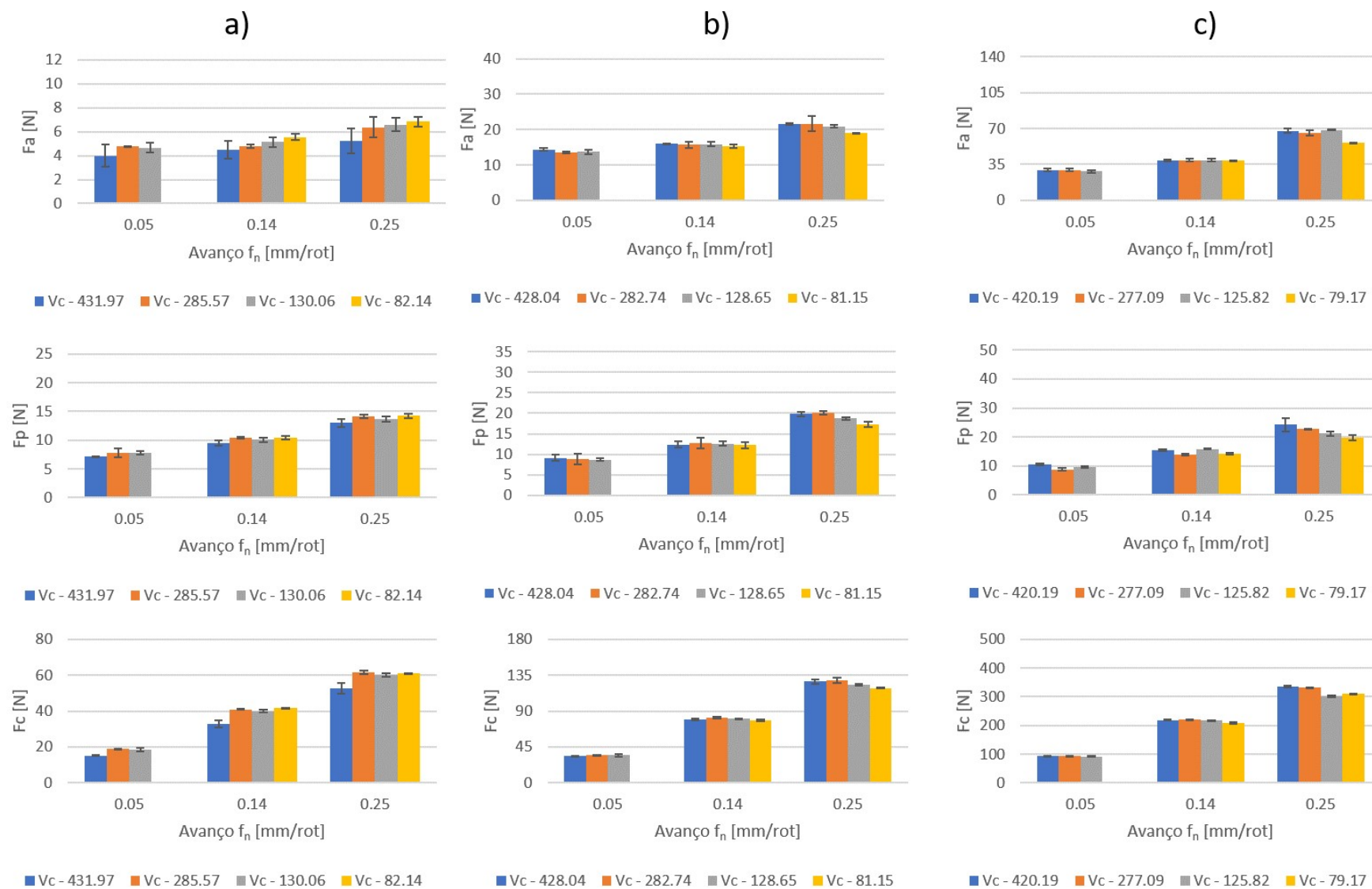


Figura A.2: Esforços de corte, para a liga L, para: a) $a_p = 0.25$, b) $a_p = 0.5$ e c) $a_p = 1.5$ mm (V_c em m/min)

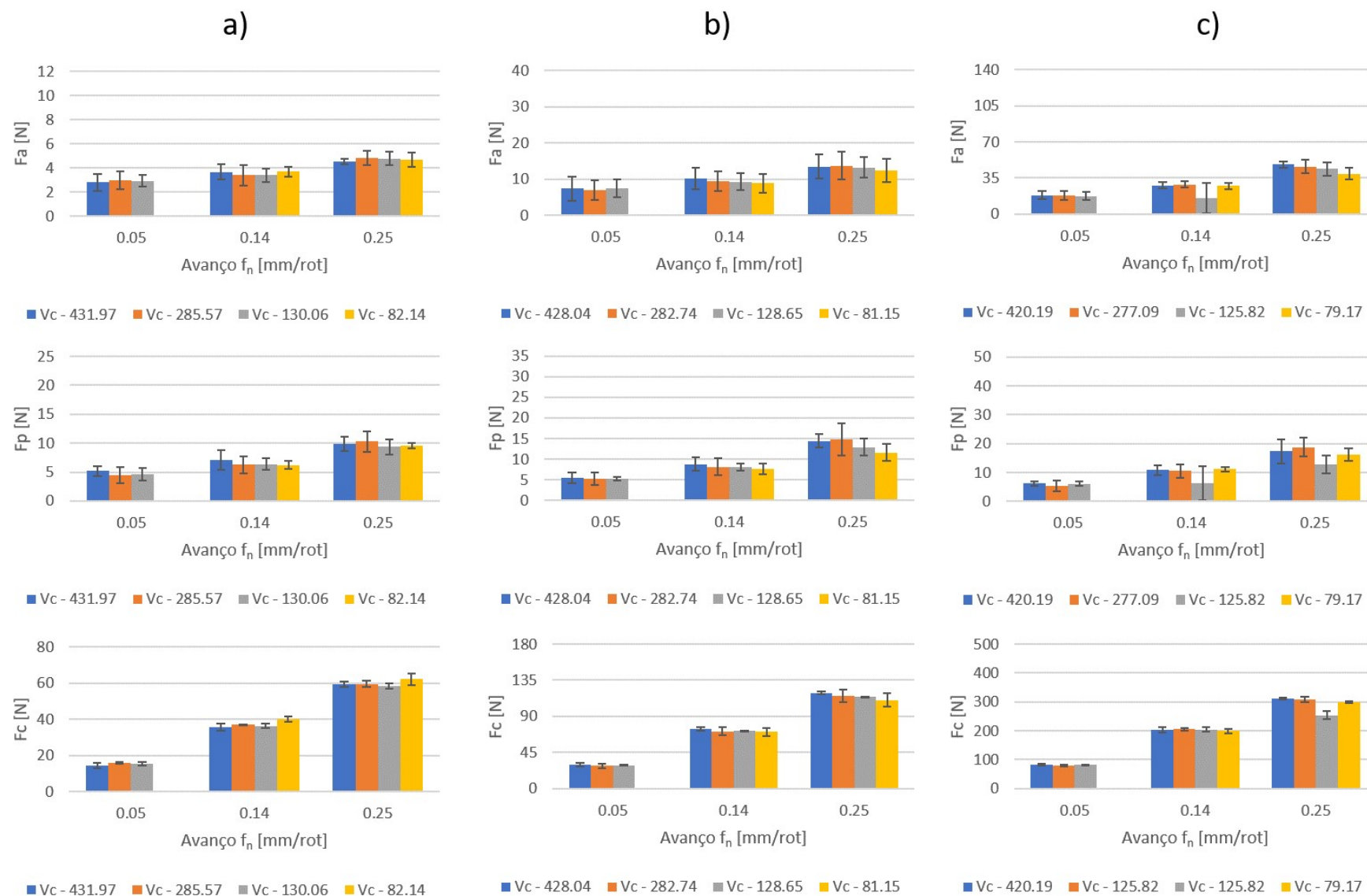


Figura A.3: Esforços de corte, para a liga R, para: a) $a_p = 0.25$, b) $a_p = 0.5$ e c) $a_p = 1.5$ mm (V_c em m/min)

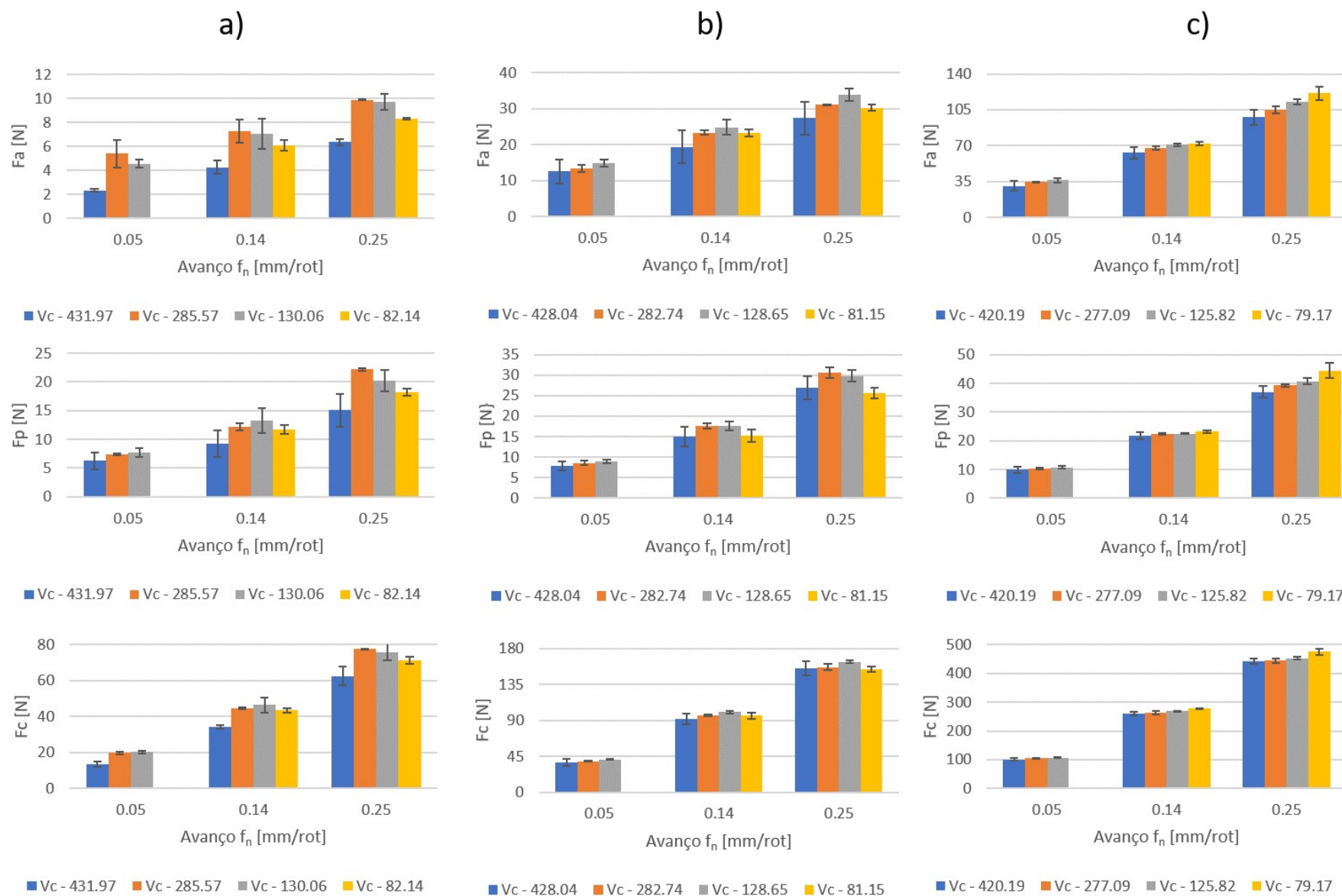


Figura A.4: Esforços de corte, para a liga Z, para: a) $a_p = 0.25$, b) $a_p = 0.5$ e c) $a_p = 1.5$ mm (V_c em m/min)

Anexo B

Ensaio furação

A Figura B.1 ilustra um dos vários produtos maquinados na GROHE onde a ferramenta utilizada como referência nos ensaios de furação é utilizada. Para esse mesmo produto e como é ilustrado na Figura B.1, não existe simetria de modo a facilmente garantir uma boa fixação da peça durante o processo. Como tal, foi necessário desenvolver e construir um sistema capaz de suplantar essas dificuldades, ilustrado na Figura B.2. O mecanismo é relativamente simples e a peça é posicionada, independentemente da sua geometria assimétrica, com recurso a parafusos ajustáveis.

O código CNC (ver Anexo B) é referente ao programa utilizado na fresadora CNC para os ensaios de furação. Ensaios esses nos quais foi utilizada uma ferramenta de referência (ver Figura B.3) aplicada com e sem revestimentos, num total de 5 unidades.

As seguintes figuras são referentes aos esforços e binário de corte (F_x , F_y , F_z e M_z) para diferentes valores de produção efetuada. As Figuras B.4, B.5 e B.6 são referentes às produções da 1ª peça, 4000ª peça e última efetuadas, respetivamente. Cada ferramenta apresenta dois perfis de esforços distintos correspondentes a duas geometrias de furos distintos (a) furo maior e b) furo menor).

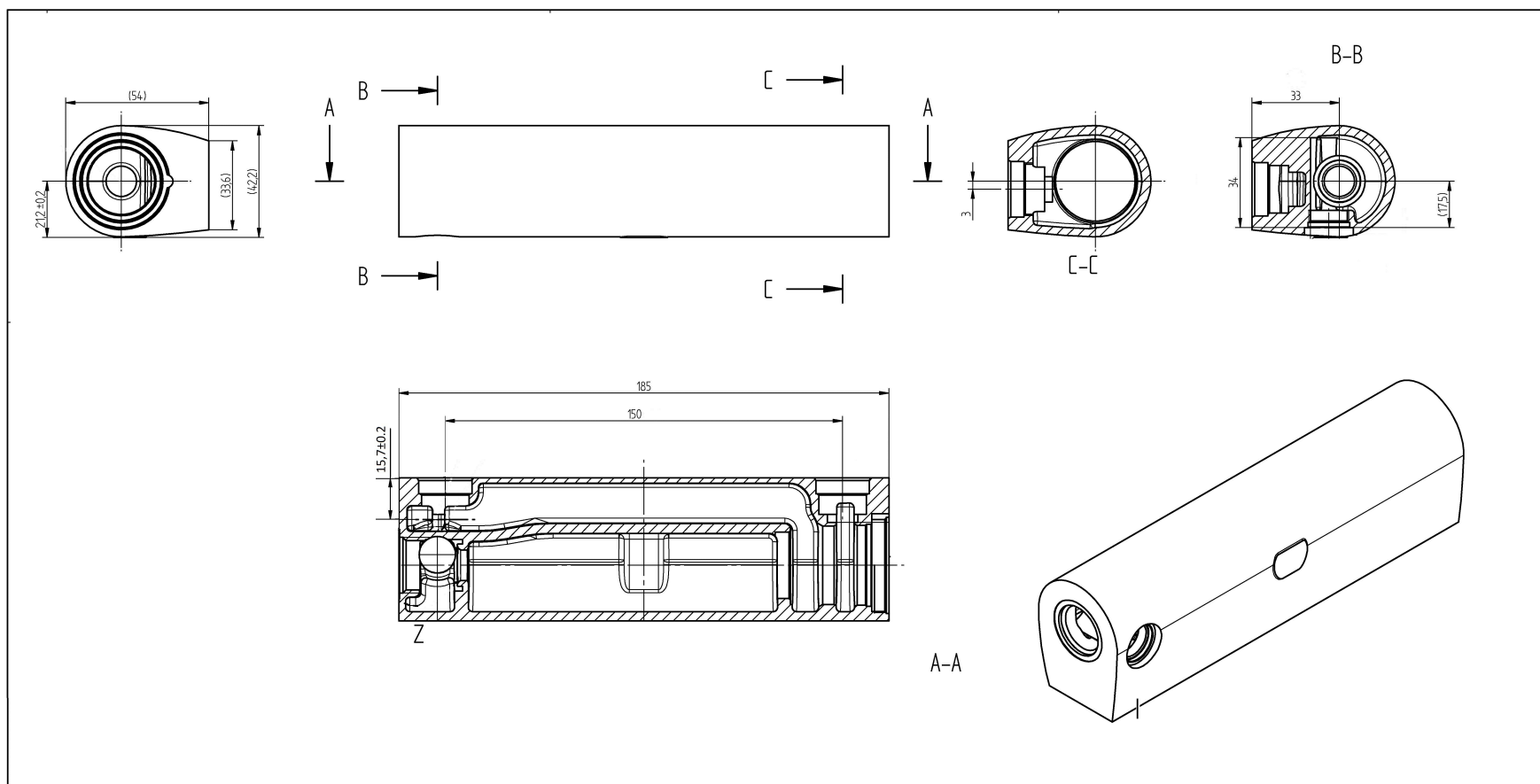


Figura B.1: Desenho e principais dimensões do componente de chuveiro - GROHE

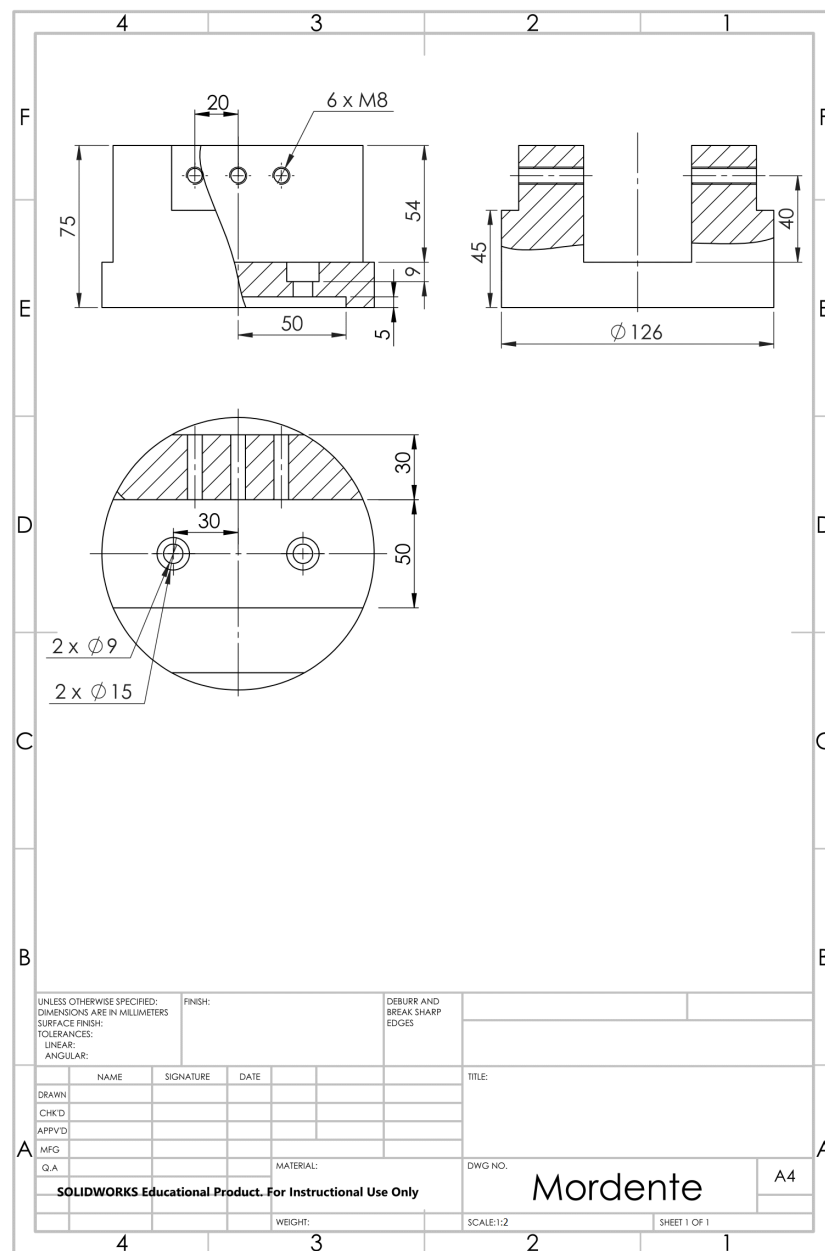


Figura B.2: Desenho do mordente fabricado para os ensaios de furação, escala 1:2

Código CNC

% FURO

N5 M140

N10 G15H03

N15 G90 G40 G17

N20 D03

N25 G00 Z15.000 S2500 M03

N30 G11 P0

N35 X-3.000 Y0.000

N40 G01 Z0.000 F600

N45 CALL OSUB Q1

N50 G90 G00 Z100.000 M05

N55 M30

OSUB

N60 G1 G91 Z-14.700

N65 G90 G40 Z-15.700 F150

N70 Z10.000

N75 G1 G40 X-3.000 Y0.000

RTS

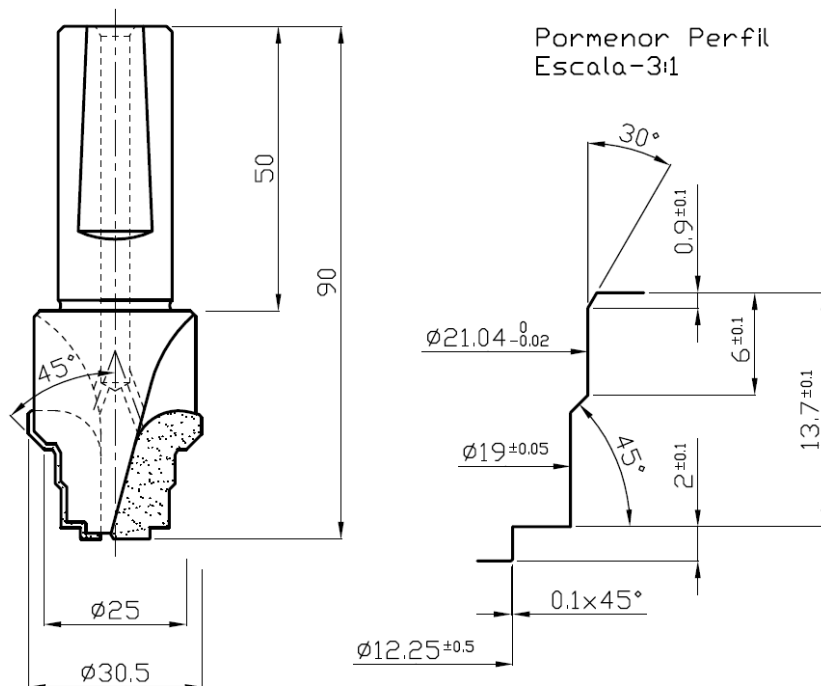


Figura B.3: Desenho da geometria da ferramenta de corte



Figura B.4: Esforços de corte e binário de corte para a produção da 1ª peça: a) referente ao furo maior e b) referente ao furo menor

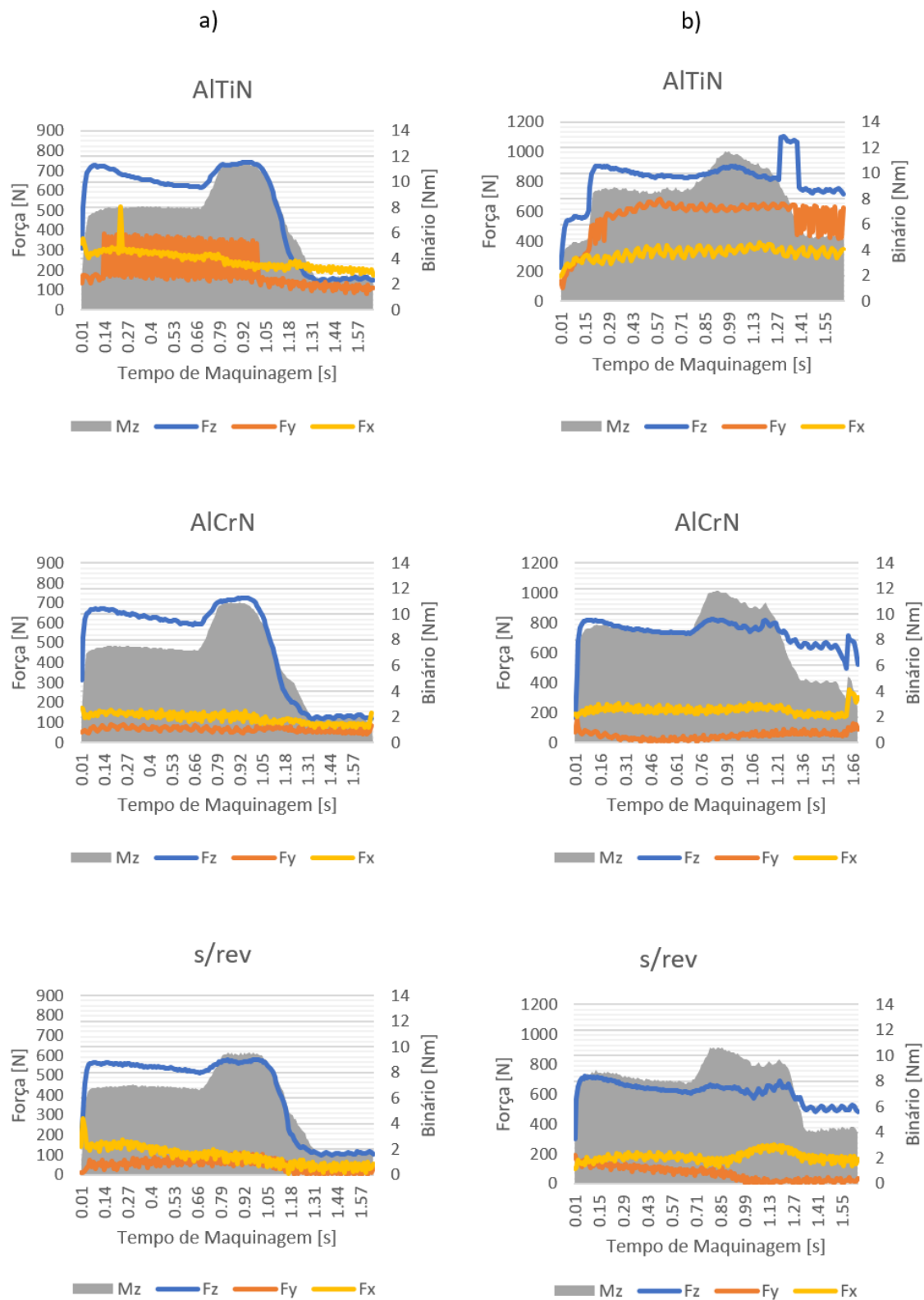


Figura B.5: Esforços de corte e binário de corte para a produção da 4000^a peça: a) referente ao furo maior e b) referente ao furo menor

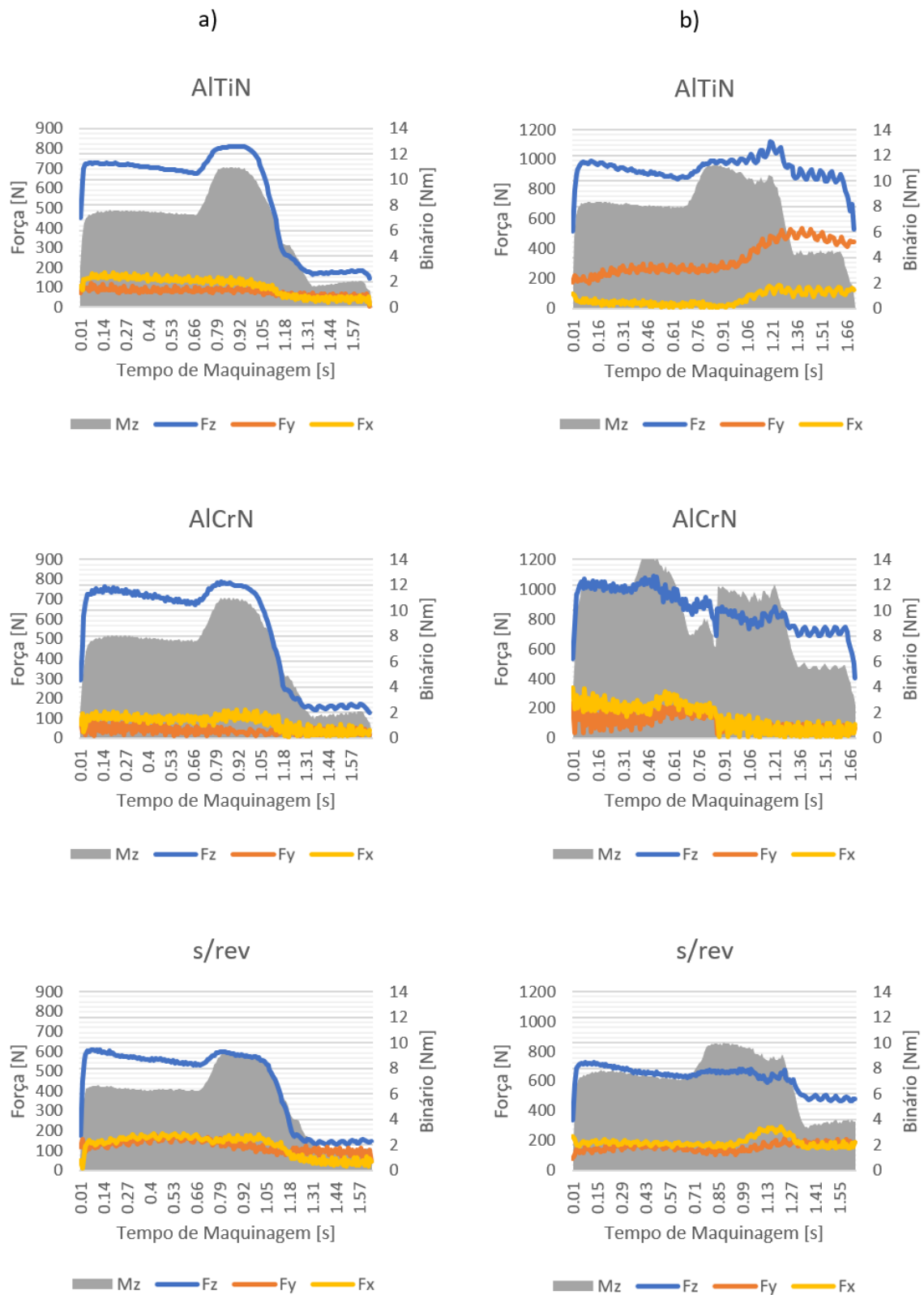


Figura B.6: Esforços de corte e binário de corte para a furação final: a) referente ao furo maior e b) referente ao furo menor